

Grado Universitario en Ingeniería Electrónica Industrial y
Automática
(2018-2019)

Trabajo Fin de Grado

“Utilización de curvas de Bézier para la mejora de trayectorias GNSS en entornos urbanos”

Jesús Antonio Hernández San José

Tutor

David Martín Gómez

Madrid, a 21 de Febrero de 2019



[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a mi tutor David Martín toda la ayuda, la constancia y la permanente atención que ha tenido conmigo, lo cual me ha permitido aprender en este tiempo todo lo relacionado para iniciarme en los temas tratados en el presente trabajo.

Agradecer también a los profesores con los que he aprendido mucho a lo largo del grado. Asimismo agradecer a amigos y familiares que me han apoyado y ayudado, sobretodo a mi hermano, mi madre y en especial mi padre, a quien dedico este trabajo.

Resumen

Se estima que el número de vehículos autónomos vaya en aumento conforme se vayan mejorando las tecnologías de asistencia a la conducción y los sistemas de navegación. En este proyecto se pretende mostrar la aplicación de la curva de Bézier para corregir y mejorar las trayectorias dadas por el uso de los distintos sistemas de navegación por satélite GNSS existentes en la actualidad para posteriormente poder ser utilizadas y seguidas por un vehículo de forma autónoma, contribuyendo así a la redundancia de información ofrecida por los sistemas avanzados de ayuda a la conducción ADAS para que el movimiento de estos vehículos sea sencillo y seguro. Con la aplicación de las curvas de Bézier se espera poder simular el movimiento natural de un vehículo y así poder facilitar la trayectoria que deben seguir de manera autónoma.

Palabras clave: trayectorias GNSS, curvas de Bézier, vehículos autónomos, sistemas GNSS.

Índice de contenidos:

Capítulo 1. Introducción	11
1.1. Motivaciones	11
1.2. Objetivo del trabajo	12
1.3. Estructura del trabajo	12
Capítulo 2. Estado de la cuestión	13
2.1. Vehículos autónomos	13
2.1.1 Motivaciones del coche autónomo	13
2.1.2. Definición y clasificación de los vehículos autónomos	14
2.1.3. Actualidad de los vehículos autónomos	18
2.1.4. Actualidad en sistemas de navegación y seguimiento en vehículos autónomos	19
2.2. Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)	20
2.2.1. Descripción y funcionamiento	20
2.2.2. Breve historia	26
2.2.3. Actualidad de los sistemas GNSS	27
2.2.3.1. Sistemas plenamente operativos	28
2.2.3.2. Sistemas en proyecto	31
2.2.3.3. Otros sistemas en proyecto: QZSS e IRNSS	32
2.2.3.4. Sistemas de Aumentación regionales	33
2.2.4. Georreferenciación de los sistemas GNSS	33
2.2.4.1. Coordenadas geográficas clásicas	34
2.2.4.2. Coordenadas geográficas utilizadas en GNSS	34
2.2.4.3. Coordenadas proyectadas UTM	36
Capítulo 3. Curvas de Bézier	38
3.1. Introducción	38
3.2. Curva de Bézier	38
3.3. Tipos de curva de Bézier	40
3.3.1. Curva de Bézier lineal	40
3.3.2. Curva de Bézier cuadrática	40
3.3.3. Curva de Bézier cúbica	40
3.3.4. Curva de Bézier de órdenes superiores	40
Capítulo 4. Aplicación de las curvas de Bézier para trayectorias GNSS	42
4.1. Motivaciones	42
4.2. Muestras de aplicaciones de la curva de Bézier	43
4.3. Propuesta de soluciones para mejorar las trayectorias GNSS	44

4.3.1. Explicación de la obtención de trayectorias.....	44
4.3.2. Observaciones de aplicabilidad de las curvas.....	44
4.3.3. Modelo propuesto aplicado a la obtención de curvas.	45
Capítulo 5. Desarrollo y resultados experimentales del modelo para la mejora de trayectorias GNSS.....	49
5.1. Observaciones de los datos facilitados por el navegador GNSS.....	49
5.2. Observación de la trayectoria inicial	53
5.3. Método de las pendientes.....	55
5.4. Método de diferencia de ángulos.....	58
5.4.1. Mediante el dato de rumbo proporcionado por el navegador.....	58
5.4.2. Mediante coordenadas polares.....	59
5.5. Explicación las coordenadas a corregir.....	61
5.6. Resultados y análisis.....	63
5.6.1. Aplicación del algoritmo detectando errores por el método de la diferencia de pendientes.....	63
5.6.1.1. Vías interurbanas	65
5.6.1.2. Vías urbanas	66
5.6.1.3. Corrección de entorno urbano de 17 puntos con nube posterior de 35 puntos:	69
5.6.2. Aplicación del algoritmo detectando errores por el método de la diferencia de ángulos.....	71
5.6.2.1. Vías interurbanas	73
5.6.2.2. Vías urbanas	74
5.6.3. Análisis de las pruebas realizadas.....	76
5.7. Aplicación del algoritmo inteligente RANSAC para la mejora de estimación de trayectorias en calles céntricas y zonas muy urbanizadas.....	77
Capítulo 6. Conclusiones.....	82
Capítulo 7. Propuestas a mejorar en el futuro	83
Capítulo 8. Marco Regulador.....	84
Capítulo 9. Entorno socioeconómico	86
9.1. Presupuesto	86
9.2. Impacto socio-económico.....	87
Capítulo 10. Bibliografía.....	89

Índice de tablas

Tabla 1: Datos ofrecidos por el navegador NovAtel sobre la medida de la posición	51
Tabla 2: Datos ofrecidos por el navegador NovAtel sobre la medida de la velocidad	52
Tabla 3: Costes materiales del proyecto.....	86
Tabla 4: Costes de personal del proyecto.....	86
Tabla 5: Presupuesto total del proyecto.....	86

Índice de figuras

Capítulo 2: Estado de la cuestión:

Ilustración 1: Número de fallecidos en España desde 1960 hasta 2017	13
Ilustración 2: Datos de accidentes con víctimas en 2017 (Cataluña y País Vasco excluidos)...	14
Ilustración 3: Distintos grados de autonomía en función de la actuación del conductor.....	16
Ilustración 4: Imagen de la visión Lidar de tecnología Luminar y Volvo.....	17
Ilustración 5: Capacidad de los distintos sistemas ADAS para captar información en el entorno.....	18
Ilustración 6: Partes de las que se compone un sistema GNSS.	21
Ilustración 7: Ejemplo de uso de código para calcular el tiempo de propagación.....	22
Ilustración 8: Medición de fase	23
Ilustración 9: Localización de un punto en un GNSS.	23
Ilustración 10: Errores provocados por el entorno en la recepción de señales.	25
Ilustración 11: Ejemplo de corrección de señal con sistemas inerciales.	26
Ilustración 12: Bandas de señales GNSS cuando sean modernizados los sistemas GPS y GLONASS y finalizados los programas GALILEO y BeiDou para el año 2020	28
Ilustración 13: Modelo de órbita GPS	28
Ilustración 14: Modelo de órbita GLONASS	30
Ilustración 15: Sistemas de Aumentación SBAS repartidos en el mundo.....	33
Ilustración 16: Sistema WGS84	35
Ilustración 17: Proyección de Mercator de la superficie de la Tierra dibujada sobre una superficie cilíndrica.....	36
Ilustración 18: Cuadrícula del planeta dividido en sus correspondientes zonas.....	37

Capítulo 3: Curva de Bézier:

Ilustración 19: Curva de Bézier, dibujada de unir sucesivamente, en orden, los distintos puntos de los segmentos que forman el polígono de control.	38
Ilustración 20: Imágenes para t aumentando cada 0.1 y para t aumentando cada 0.01 respectivamente.....	39
Ilustración 21: Curva de Bézier de grado 2.....	40
Ilustración 22: Curva de Bézier de grado 3	40
Ilustración 23: Cambio de las curvas en función de los puntos que forman el polígono de control.	41

Capítulo 4: Aplicación de las curvas de Bézier para trayectorias GNSS:

Ilustración 24: Trayectoria proporcionada por Google Maps.....	43
Ilustración 25: Diagrama de funcionamiento del algoritmo	46

Capítulo 5: Desarrollo y resultados experimentales del modelo para la mejora de trayectorias GNSS:

Ilustración 26: Imagen general de la trayectoria registrada.....	53
Ilustración 27: Imagen de detalle de zona céntrica.....	54
Ilustración 28: Imágenes para error>0.7 y para error>3.	56
Ilustración 29: Diagrama de funcionamiento de detección mediante diferencia de pendientes	57
Ilustración 30: Diagrama de funcionamiento de detección mediante diferencia de ángulos con coordenadas polares	60
Ilustración 31: Diagrama esquemático de los distintos puntos a utilizar para la aplicación de las curvas de Bézier	62
Ilustración 32: Imagen de la trayectoria inicial	64
Ilustración 33: Imagen de la trayectoria recogida con error máximo de 0.7 y desviación máxima de 2.8m	64
Ilustración 34: Trayectoria inicial de zona urbana.....	66
Ilustración 35: Trayectoria final de la zona urbana, resuelto por pendientes.....	67
Ilustración 36: Caso 1	67
Ilustración 37: Caso 2.....	68
Ilustración 38: Caso 3	68
Ilustración 39: Trayectoria inicial	69
Ilustración 40: Trayectoria final, por pendientes con 17 puntos corregidos y 35 de nube posterior.....	70
Ilustración 41:	70
Ilustración 42:	71
Ilustración 43: Imagen inicial	72
Ilustración 44: Imagen final, corregida con la diferencia de ángulos mediante coordenadas polares	72
Ilustración 45: Trayectoria inicial	74
Ilustración 46: Trayectoria final, detectando errores mediante diferencia de ángulos	75
Ilustración 47: Imagen inicial	78
Ilustración 48: Trayectoria obtenida tras la aplicación de RANSAC para estimar las rectas....	79
Ilustración 49: Detalle 1 - Imágenes comparativas sin corregir y corregida utilizando RANSAC	80
Ilustración 50: Detalle 2: Imágenes comparativas antes y después de corregir con RANSAC.	80
Ilustración 51: Detalle 3 de la corrección con RANSAC	81

Capítulo 1. Introducción

1.1. Motivaciones

Ante las cifras de siniestralidad en las últimas décadas, consideradas en su mayoría provocadas al error humano, la investigación sobre el coche autónomo ha avanzado bastante como posible solución a mejorar la seguridad vial.

Hoy día distintas marcas ya han puesto en el mercado variedad de coches con cierto nivel de automatización para que, solo o bajo supervisión del conductor, se puedan reducir las causas de un posible siniestro mediante el uso de distintas tecnologías a la vez, como lo son los sensores de movimiento, visión y detección de obstáculos mediante imágenes y seguimiento de ruta mediante sistemas de localización por satélite. Aun así son todavía poco comunes debido al elevado precio y solo se han implantado a nivel comercial por parte de empresas como Uber o Waymo, de Google, pero se espera que aumente su cantidad en las carreteras conforme se vayan mejorando y abaratando con el paso del tiempo.

A pesar de los grandes avances en seguridad y de los Sistemas Avanzados de Ayuda a la Conducción (ADAS), se pueden producir imprevistos o situaciones poco comunes en las cuales se pueda llegar a poner en peligro la vida de conductores o viandantes, como fue el caso de un atropello de un vehículo autónomo Uber en Estados Unidos en 2017. Para evitarlos se sigue investigando y mejorando los sistemas, también en búsqueda de conseguir poco a poco la autonomía total.

Una de las cosas más importantes que debe manejar el coche autónomo es la trayectoria por la cual se debe de mover. Sin conocerla, el vehículo no podrá dirigirse a ningún lugar, cobrando importancia la navegación por satélite como herramienta para dirigirlos y explotando estos sistemas mediante otras herramientas para que el trayecto dirigido sea lo más limpio posible, mejorando así la seguridad de ocupantes y viandantes.

A la hora de marcar estas trayectorias se pueden hacer de diversos modos, siendo una de las mejores el que previamente se recorra y se guarde la trayectoria recorrida para que a continuación se procese su señal. Este es el método que se va a tratar en este trabajo y que se pretende mejorar, ya que los sistemas GNSS tienen una mayor precisión en entornos que tengan contacto pleno con el cielo y se pueden producir errores de precisión, sobre todo en entorno urbano.

1.2. Objetivo del trabajo

En este presente trabajo se pretende mostrar la utilidad de la aplicación de las curvas de Bezier para corregir y mejorar las trayectorias de vehículos recogidas mediante sistemas de navegación por satélite (GNSS). Dichas trayectorias están destinadas al uso posterior de vehículos autónomos para dirigir su camino.

Al mismo tiempo se pretende mostrar métodos y algoritmos pensados para corregir estas trayectorias previamente recogidas mediante señales de navegación por satélite, y además que se pretendan arreglar de forma automática mediante el uso de software.

Cabe decir que para este proyecto las pruebas y simulaciones se han realizado mediante el entorno de programación Matlab.

1.3. Estructura del trabajo

El trabajo que se expone pretende desde el comienzo partir de una base sólida para fundamentar el proyecto realizado.

En el *Estado de la Cuestión* (2) se procede a explicar la situación de los Vehículos Autónomos y de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite GNSS a día de hoy, detallando en mayor medida esta última parte debido al trabajo sobre trayectorias que se realiza en este proyecto. Asimismo se detallan los distintos sistemas y clasificaciones en función de los objetivos perseguidos en este proyecto.

Una vez explicada la actualidad de los vehículos autónomos y de los sistemas GNSS, se procede a explicar el tipo de *Curva de Bézier* (3), explicando su construcción, características y propiedades, para a continuación explicar las *Aplicación de las Curvas de Bézier para trayectorias GNSS* (4) y proponer el modelo pensado para su aplicación en la mejora de trayectorias GNSS.

Vistas las aplicaciones de este tipo de curva, se explica a continuación los métodos creados para aplicarlas en trayectorias recogidas por GNSS en *Desarrollo y resultados experimentales del modelo para la mejora de trayectorias GNSS* (5). Seguidamente se exponen las *Conclusiones* (6) y las *Propuestas a mejorar en el futuro* (7) de este proyecto.

Este proyecto también recoge información sobre el *Marco regulador* (8) en el cual se analiza el estado legal de los vehículos autónomos en la actualidad, a la cual está sujeto las expectativas de este proyecto, y un estudio sobre el *Entorno socio-económico* (9) del presente proyecto.

Capítulo 2. Estado de la cuestión

2.1. Vehículos autónomos

2.1.1 Motivaciones del coche autónomo

La idea del coche autónomo se ha desarrollado a lo largo de los años a través de diversas cuestiones. Además de la propia comodidad de que un automóvil pueda llevar a una persona de forma automática con poca o nula necesidad de conducirlo, el principal motivo para su desarrollo es el de la seguridad tanto para conductor y pasajeros como para peatones.

En las últimas décadas el número de siniestros tanto en España como en el conjunto de la Unión Europea ha disminuido considerablemente. Sin embargo el número de 1830 fallecidos en carreteras españolas en 2017 [13] sigue sugiriendo que es un problema a tener en cuenta.

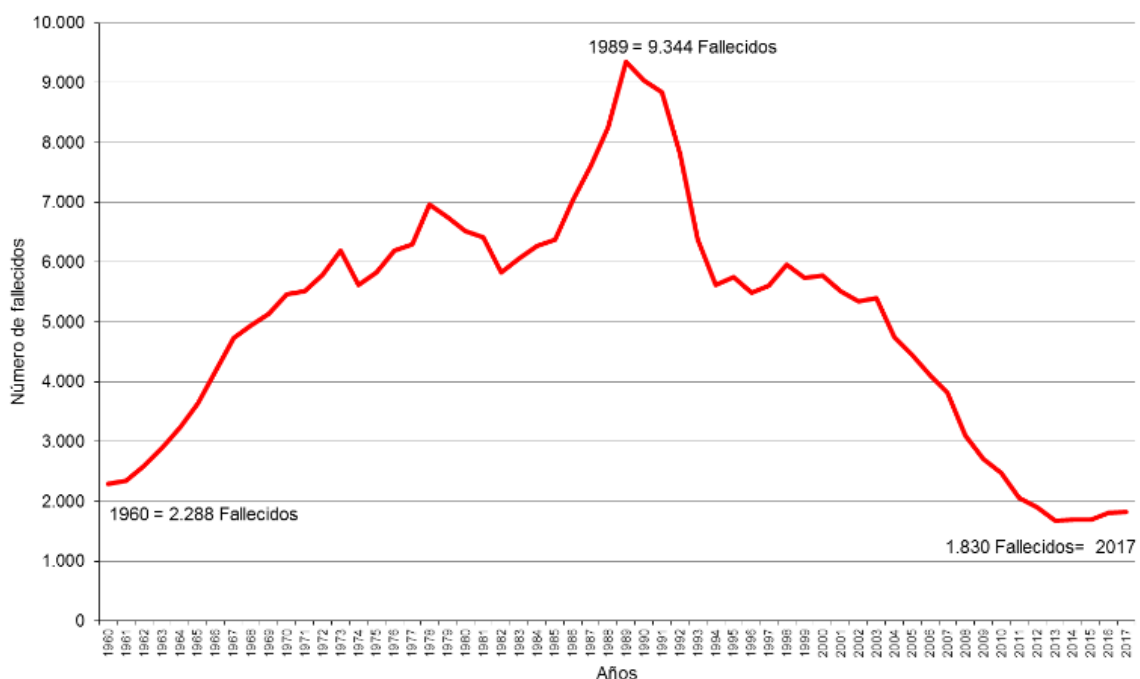


Ilustración 1: Número de fallecidos en España desde 1960 hasta 2017. Fuente: DGT (2017) [13]

Contando con que la mayoría de estos siniestros se producen bajo el error humano, se puede considerar que con la tecnología de hoy día aplicada a la conducción de vehículos se puede disminuir la cifra de siniestros y con ello la disminución de víctimas mortales.

FACTOR CONCURRENTE	ACCIDENTES CON VÍCTIMAS		ACCIDENTES MORTALES	
	CASOS	% SOBRE TOTAL ACCIDENTES	CASOS	% SOBRE TOTAL ACCIDENTES
CONDUCCIÓN DISTRAÍDA O DESATENTA	7.634	29%	330	37%
VELOCIDAD INADECUADA	4.902	18%	281	31%
ALCOHOL*	1.677 (de 16.213)	10%	167 (de 645)	26%
OTRA INFRACCIÓN	1.683	6%	176	20%
CANSANCIO O SUEÑO	2.351	9%	136	15%
NO RESPETAR PRIORIDAD	3.968	15%	58	6%
IRRUPCIÓN DE PEATÓN	234	1%	54	6%
ADELANTAMIENTO ANTIRREGLAMENTARIO	624	2%	40	4%
NO MANTENER INTERVALO DE SEGURIDAD	5.167	19%	27	3%
ENFERMEDAD	539	2%	18	2%
GIRO INCORRECTO	715	3%	14	2%
CONDUCCIÓN NEGLIGENTE	239	1%	11	1%
INEXPERIENCIA CONDUCTOR	318	1%	5	1%
CONDUCCIÓN TEMERARIA	109	<1%	13	1%

Nota: El total de accidentes con víctimas considerado es 26.326 y el total de accidentes mortales es 895. En un mismo accidente pueden estar implicados varios factores.

* En el caso del alcohol, se considera la muestra de 16.213 accidentes con víctimas y una muestra de 645 accidentes mortales en los que se han hecho pruebas a todos los conductores implicados. Cuando al menos una de las pruebas es positiva, se considera que el factor concurrente alcohol está presente. No se realiza un análisis análogo en el caso de las drogas debido al tamaño muestral.

Ilustración 2: Datos de accidentes con víctimas en 2017 (Cataluña y País Vasco excluidos). Fuente: DGT (2017)

Ya desde hace varios años los llamados Sistemas Avanzados de Ayuda a la Conducción ADAS (*Advance Driver Assistance Systems*) se han estado incorporando poco a poco a los vehículos para ir aumentando la comodidad y seguridad en carretera, aunque la mayoría de éstas sirven hoy día para ayudar a la conducción y no son utilizadas del todo para un movimiento autónomo del vehículo, como veremos en el siguiente punto de este capítulo. Según la DGT (*Dirección General de Tráfico*), el número de siniestros en carretera se ha reducido en los últimos años gracias a la aplicación de éstas tecnologías [14].

2.1.2. Definición y clasificación de los vehículos autónomos

Por coche u automóvil autónomo nos referimos al vehículo terrestre con capacidad de moverse de forma autónoma por vía pública, recibiendo información del medio y actuando conforme a ello mediante unas instrucciones dadas. Según la Dirección General de Tráfico, “*vehículo autónomo es todo aquel que dispone de capacidad motriz equipado con tecnología que permita su manejo o conducción sin precisar la forma activa de control o supervisión de un conductor, tanto si dicha tecnología autónoma estuviera activada o desactivada de forma temporal o permanente*”¹, es decir, es autónomo todo

¹ <http://www.dgt.es/Galerias/prensa/2015/11/NP-pruebas-vehiculos-conduccion-automatizada.pdf>

vehículo que tenga la capacidad de moverse de forma autónoma aunque esta capacidad sea activada de forma permanente o temporal, de modo que según su autonomía la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, del inglés '*Society of Automotive Engineers*') estableció una clasificación² en el año 2014 que se establece del siguiente modo:

➤ **Nivel 0: “Sin automatización de la conducción”.**

No hay automatización. El conductor tiene que estar constantemente dirigiendo el vehículo para toda situación y escenario. En este nivel no se tienen en cuenta los sistemas de ayuda a la conducción que puedan influir sobre su movimiento, tales como el ABS o el control de tracción, o sistemas que avisen de alguna advertencia, como sensores de ángulo muerto o estado de las ruedas.

➤ **Nivel 1: “Asistencia al conductor”.**

Se considera este nivel a vehículos que permiten controlar de manera autónoma la velocidad y el movimiento longitudinal, frenando o acelerando el vehículo en función de lo que decida el conductor tal y como funcionan los vehículos con control de velocidad de crucero, o a su vez el volante en situaciones de asistencia en el aparcamiento mientras el conductor controla los pedales. Aunque el coche en este nivel se sirva de información del entorno con ayuda de sensores, el conductor igualmente debe de estar atento y controlando el vehículo.

➤ **Nivel 2: “Automatización parcial de la conducción”.**

Los vehículos de este nivel se consideran semiautónomos, considerando que ante ciertas situaciones se puede controlar el vehículo de forma autónoma manteniéndose en el carril, controlando tanto la velocidad como la dirección. Igualmente el conductor debe de estar atento para tomar el control si es necesario, ya que solo es posible que el vehículo se mueva en ese estado en determinadas situaciones.

➤ **Nivel 3: “Automatización de la conducción”.**

En este nivel el vehículo puede tomar el control sobre la conducción aunque de forma limitada, como por ejemplo en entornos como las autopistas. No es necesario que el conductor esté vigilando la conducción, pero deberá estar disponible para intervenir ante situaciones de peligro o que no sepa cómo actuar en consecuencia.

➤ **Nivel 4: “Alta automatización de la conducción”.**

Alto nivel de automatización. En este nivel el vehículo puede moverse de forma autónoma en un entorno de circulación y siendo capaz de actuar ante situaciones

² https://www.sae.org/standards/content/j3016_201401/

de peligro. Para ello se procura que siempre se mueva en entornos seguros y de la forma más segura posible, por lo que no hace falta que el conductor se encuentre atento a la conducción, pero debe de estar disponible en todo momento para casos que, al igual que en el nivel 3, no pueda ni conozca cómo actuar.

➤ **Nivel 5: “Automatización total de la conducción”.**

Automatización completa. El vehículo debe ser capaz de moverse de forma autónoma por todo lugar disponible para la circulación sin intervención de un conductor, siendo capaz de reaccionar correctamente ante situaciones difíciles de conducción o de peligro.



Ilustración 3: Distintos grados de autonomía en función de la actuación del conductor. Fuente: RACE - <https://www.race.es/coches-autonomos-carrera-autonomia-total>

Actualmente se ha llegado a tener vehículos de nivel 3 o 4, ya que la dificultad de poner a prueba el movimiento autónomo en todos los escenarios posibles es difícil de cuantificar y de calificar, incluso a veces para los seres humanos, y el riesgo de cualquier imprevisión que no se haya tenido en cuenta previamente complica el avance hacia la autonomía total. Aun así los avances tecnológicos en ADAS han permitido que el vehículo reconozca mejor el entorno en el que se encuentra y se haya podido avanzar en una mejor autonomía del coche.

La tecnología ADAS puede tener varias aplicaciones como la detección de ángulos muertos, asistentes de cambios de carril, control de crucero adaptativo, detección de peatones u obstáculos, detección de señales o luces o incluso detección de somnolencia del propio conductor, pero estas aplicaciones están basadas en tecnología que proporciona información sobre el entorno. Algunas de éstas son:

- **Radars:** mediante la emisión de ondas electromagnéticas de distintas longitudes de onda y su recepción al reflejarse en los objetos que se encuentren, pueden permitir conocer el entorno y actuar conforme a él.

- **Lidar o láser:** de forma parecida al radar, pero más potente, permite conocer el entorno mediante la emisión de haces de láser que al recibir sus reflejos puede dar información detallada del entorno.

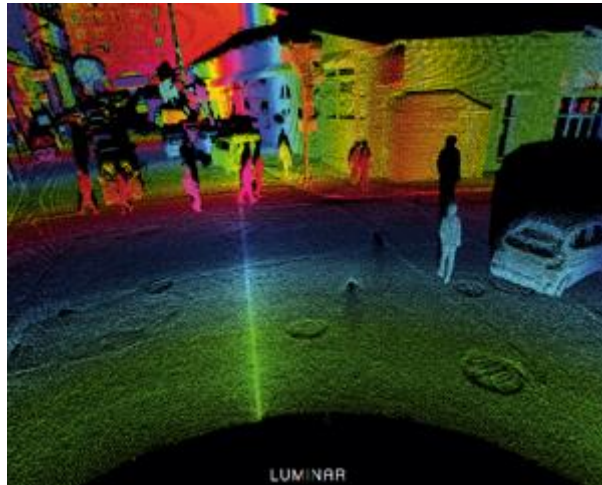
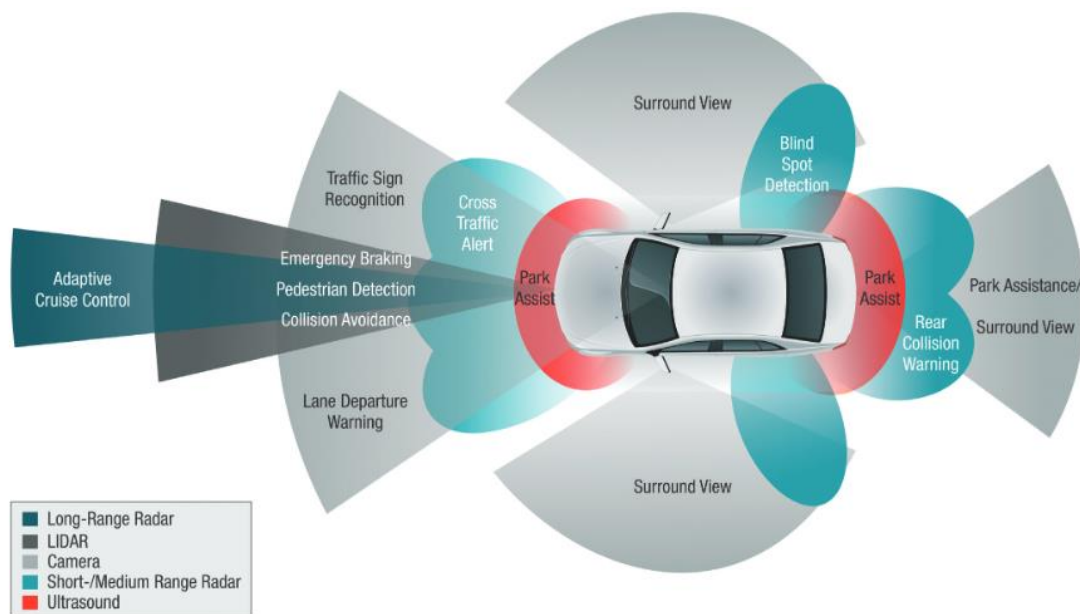


Ilustración 4: Imagen de la visión Lidar de tecnología Luminar y Volvo. Fuente: <https://www.nature.com/articles/s41566-018-0235-z>

- **Cámara:** La detección de objetos mediante procesamiento de imagen permite visiones en profundidad del entorno del vehículo. Pueden utilizarse de distintos tipos y formas según sea la necesidad para las que sean utilizadas, como infrarrojas o angulares. Son utilizadas tanto para medir distancias como para distinguir, mediante patrones, los distintos obstáculos que se encuentre monitoreando.
- **Sensores ultrasonidos:** con el mismo principio físico que el radar y el lidar, los sensores de ultrasonidos captan información a corto alcance mediante la emisión y recepción de ultrasonidos. Son muy utilizados en asistencia de estacionamiento de vehículos, así como para otras funciones relacionadas con la detección a distancias cortas, como el detector de ángulo muerto.

Cada una de esas tecnologías puede fallar advirtiendo al vehículo de un falso positivo, de modo que es importante la redundancia de sistemas tanto a la hora de conseguir información del entorno como a la hora de actuar.



Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) Guide 2015

Texas Instruments

Ilustración 5: Capacidad de los distintos sistemas ADAS para captar información en el entorno. Imagen sustraída de “Advance Driver Assistance Systems (ADAS) Solutions Guide 2015” – Texas Instruments³

Además de estas tecnologías ADAS, para dirigir el vehículo autónomo es necesario tener un sistema de navegación por satélite e inercial que permita conocer la posición, seguimiento y velocidad del vehículo, así como el conocimiento cartográfico del lugar en el que se encuentra, convirtiéndose en una herramienta esencial para poder conseguir la autonomía del vehículo.

2.1.3. Actualidad de los vehículos autónomos

Desde hace varios años podemos encontrar en el mercado los vehículos que tienen control de velocidad para gamas media e incluso baja en los últimos años. También podemos encontrar vehículos a la venta de nivel 2 y 3 promocionados como alta gama. Debido a los altos costes de los equipos que requieren este tipo de vehículos, la mayoría de los coches que podemos encontrar hoy día podrían tener una automatización nula o que contengan control de velocidad de crucero, aunque ya se pueden encontrar bastantes marcas que ofrecen vehículos de nivel 2, como lo son el Mercedes Clase E, Volkswagen Golf, Seat León o el reciente Audi A7.

En el sector donde más se está investigando e incluso utilizando el vehículo autónomo, pero de forma comercial, es en el sector del transporte de personas y en compañías estadounidenses. Empresas como Uber, Waymo de Google, Tesla o Apple llevan años investigando y estudiando su utilización a nivel de usuario. Uber y Waymo actualmente se encuentra operando vehículos por ciudades estadounidenses, al mismo

³ Fuente de la imagen:

<https://uk.farnell.com/wcsstore/ExtendedSitesCatalogAssetStore/cms/asset/images/europe/common/applications/automotive/pdf/ti-adas-solution-guide.pdf>

tiempo que Uber en 2017 comenzó a prestar servicio con vehículos autónomos considerados de nivel de automatización 4.

A pesar de estas investigaciones y avances, los vehículos autónomos también irán apareciendo en el mercado según los marcos jurídicos de los países en los que vayan a operar, regulaciones que trataremos en el capítulo 8.

2.1.4. Actualidad en sistemas de navegación y seguimiento en vehículos autónomos

Como se ha comentado en el apartado 2.1.2, para conseguir que un coche tenga capacidad de circular de manera autónoma necesita un conocimiento adecuado tanto del entorno como del lugar en el que se mueve. Para ello es necesario disponer de un sistema de seguimiento mediante localización por satélite y un conocimiento cartográfico del entorno a gran escala, así como para que sea más preciso su movimiento en calles y carreteras se necesita de tecnologías ADAS para moverse mejor en entornos a pequeña escala.

Lo que se persigue hoy día es que mediante la tecnología ADAS el propio vehículo tenga un conocimiento óptimo del entorno mediante la redundancia de sistemas, de modo que la importancia de los sistemas Lidar, radar y sensores de ultrasonidos entre otros permitan obtener información del espacio que rodea al vehículo, al mismo tiempo que el reconocimiento de imágenes captadas por las cámaras de distinto tipo y ángulos permitan, ya no solo reconocer personas u obstáculos, sino que hagan una detección de líneas y de señales entre otras funciones. Al mismo tiempo que el coche reconoce su espacio alrededor, mediante sistemas de localización por satélite GNSS debe de ser conducido por la trayectoria correcta y asegurarnos de que su seguimiento es correcto.

Debido a esto tanto los sistemas ADAS como los sistemas de navegación por satélite GNSS cobran gran importancia para estos vehículos y su investigación y mejora es continua.

Existen aplicaciones que contienen una base de datos y que permiten conocer distintas rutas para ir de un lugar a otro, como pueden ser el servicio de la plataforma Google Maps u Open Street Maps. Estas rutas son útiles para conocer cuáles son los caminos apropiados para moverse, según se quiera ir más rápido o por distintas vías aunque eso dependerá del servicio y base de datos prestado por la plataforma, pero esas rutas no siempre serán correctas para dirigir bien un vehículo autónomo. Incluso suponiendo que la ruta ofrecida es correcta y permite seguir correctamente los caminos, no nos puede servir como buena guía ya que a nivel de la calzada muchas veces no se marca la trayectoria que deba recorrer un vehículo en movimiento. Para ello se procura que mediante ADAS se tenga una recreación virtual del espacio de alrededor lo más realista posible y que mediante sistemas de navegación por satélite se dirijan los movimientos de la forma más correcta posible, de modo que así aumente la seguridad de conductor, pasajeros y viandantes.

2.2. Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)

2.2.1. Descripción y funcionamiento

Por Sistema Global de Navegación por Satélite (*Global Navigation Satellite Systems – GNSS*) se entiende a un sistema de navegación por satélite de cobertura global que permite localizar una posición geoespacial⁴ en todo momento. Las infraestructuras de estos sistemas se basan principalmente en una numerosa constelación de satélites que orbita alrededor de planeta con la finalidad de cubrir todo el globo terráqueo en todo momento y recibir sus señales de forma redundante, tanto por si existe algún problema con el número de satélites disponibles o la recepción de la señal, como a la hora de calcular la posición del receptor de forma precisa.

El funcionamiento básico de un sistema GNSS se basa en medir la distancia de los satélites respecto al receptor mediante la propagación de las ondas electromagnéticas enviadas desde el satélite. Conocidas las distancias con los distintos satélites se pueden calcular su posición mediante trilateración⁵.

Todo sistema global de navegación por satélite se compone de tres sectores bien diferenciados:

1) Segmento espacial:

Se compone de la constelación de satélites que orbitan alrededor de la tierra que envían señales a los receptores, pudiendo recibir señales de los receptores de control. Los satélites pueden ser de navegación o de comunicación:

- Satélites de navegación: son aquellos que dan cobertura global moviéndose en distintos planos de la atmosfera, formando una red numerosa para conseguir un servicio robusto que proporcione una información redundante en caso de que surja algún problema tanto con el estado de los satélites como en la recepción de sus señales. Además esta redundancia permite calcular una posición más precisa.
- Satélites de comunicación: forman los sistemas de aumentación, siendo satélites geoestacionarios que están dedicados a mejorar la cobertura en una determinada área. Asimismo reciben información con correcciones de los segmentos de control.

2) Segmento de control:

El segmento de control está formado por las estaciones en tierra de seguimiento que controlan las orbitas de los satélites, siendo los encargados de corregir y ajustar las trayectorias de éstos e incluso sincronizar los relojes u osciladores. También trata de gestionar y dar soporte a la constelación GPS, monitoreando en

⁴ BERNÉ VALERI, J.L. [et al] (2014) *GNSS: GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática*. Valencia: Universitat Politècnica de València

⁵ Trilateración: cálculo de una posición por métodos geométricos.

todo momento los movimientos de cada uno de los satélites y su estado, para así realizar maniobras de recarga de baterías en caso necesario.

La organización de este sector depende del sistema, pero normalmente la información recibida se manda a una estación principal para calcular y comprobar si la posición es correcta, enviando paquetes de datos a los satélites del segmento espacial para que se corrijan los errores de posicionamiento orbital o temporal.

3) Segmento de usuario:

Se trata de todos los equipos a nivel de usuario que reciben señales procedentes del segmento espacial y que son capaces de calcular su posición estática, cinemática para ser empleados para mediciones de precisión o para navegación.

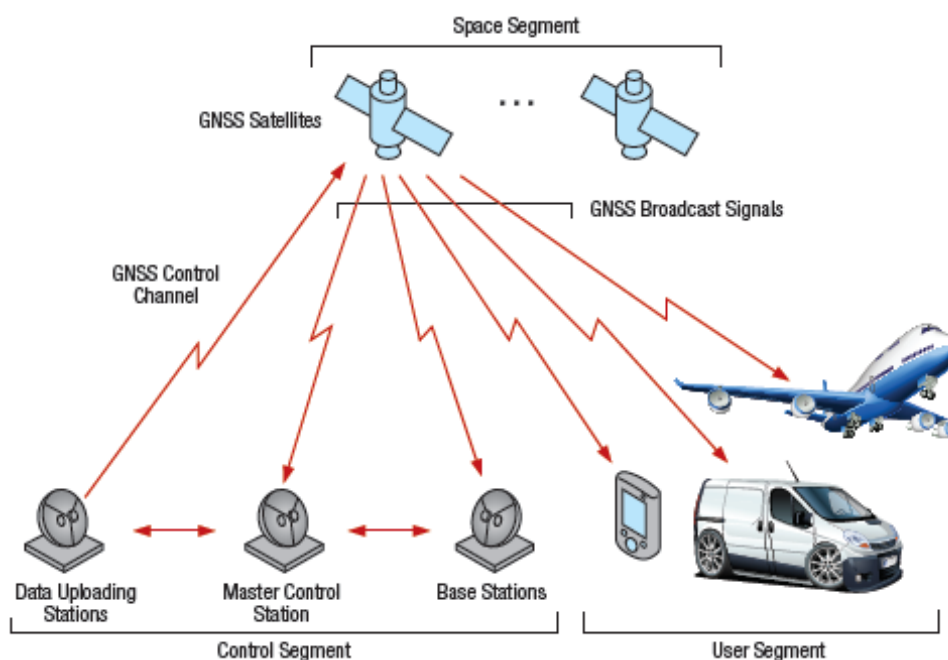


Ilustración 6: Partes de las que se compone un sistema GNSS. Imagen extraída de [3]

Las señales utilizadas en entornos GNSS suele ser del entorno de 1 - 1.5GHz y tienen poca potencia. A la hora de recibir estas señales es importante obtener la distancia de los receptores con los satélites para poder seguidamente calcular su posición. La distancia receptor-satélite se puede calcular mediante diferentes métodos:

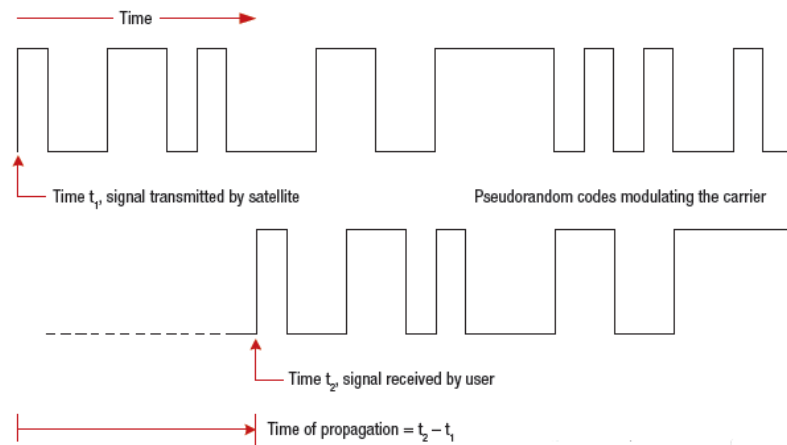
- **Medición en código de pseudodistancia:**

Con una buena sincronización podemos calcular la distancia "D" entre satélite y receptor considerando la velocidad de propagación de la onda electromagnética

enviada la de la luz en el vacío (300000 Km/s) y conociendo su posición con ayuda de las efemérides:

$$D = v \cdot t$$

A la hora de determinar correctamente el tiempo de propagación, se utilizan códigos enviados desde satélite que trata de repetir simultáneamente el receptor, de modo que cuando se recibe la señal del satélite se comparan ambas señales y el desfase de tiempos es el tiempo “t” que ha tardado la señal en su propagación. Debido a esto la importancia de la sincronización es de elevada importancia para evitar imprecisiones.



*Ilustración 7: Ejemplo de uso de código para calcular el tiempo de propagación.
Imagen sacada del Manual de Introducción GNSS [3]*

Este método es bastante preciso y es el que se utiliza en el sistema GPS estadounidense.

- **Medición por efecto Doppler:**

Se trata de calcular la posición mediante el desfase de frecuencias que se produce por el movimiento relativo entre satélite como fuente emisora y receptor. Este método no es muy preciso debido a que las variaciones de frecuencia son muy pequeñas, sin embargo funciona bastante bien a la hora de calcular la velocidad⁶.

- **Medición en fase:**

Conocida la frecuencia y la posición del satélite mediante efeméride, se trata de calcular la distancia “D” mediante N veces su longitud de onda y una parte de su longitud no entera:

$$D = \lambda \cdot (N + \Delta\phi)$$

⁶ BERNÉ VALERI, J.L. [et al] (2014) *GNSS: GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática*. Valencia: Universitat Politècnica de València”, apartado 4.4.3.: Sobre la medida de la velocidad mediante el efecto Doppler “son valores frecuentes de una precisión de 1 km/h en el 50% de los casos, y de 2 km/h en el 99% de los casos”.

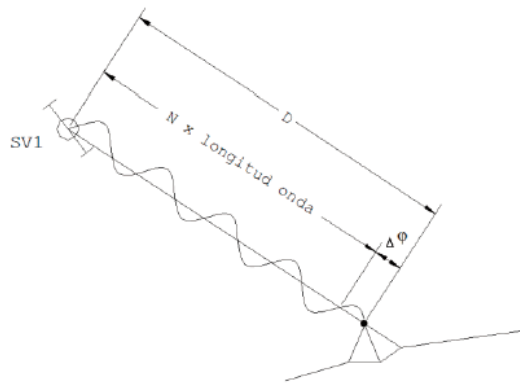


Ilustración 8: Medición de fase. Imagen sacada de [1]

Este método es muy preciso, pero debido a la dificultad de determinar el número entero N se utiliza sobretodo para determinar posiciones de alta precisión y no tanto para navegación.

Una vez calculadas las distancias del receptor con respecto a los satélites que le mandan sus respectivas señales, se puede calcular la posición exacta del receptor, con mayor o menor precisión dependiendo del sincronismo entre los dispositivos entre otros errores, como veremos más adelante.

Considerando a cada satélite una esfera de radio la distancia satélite-receptor y considerando como esfera a la Tierra, se necesitarán para marcar un punto en el espacio un total de tres satélites, de modo que la intersección entre ellas tiene un punto en común.

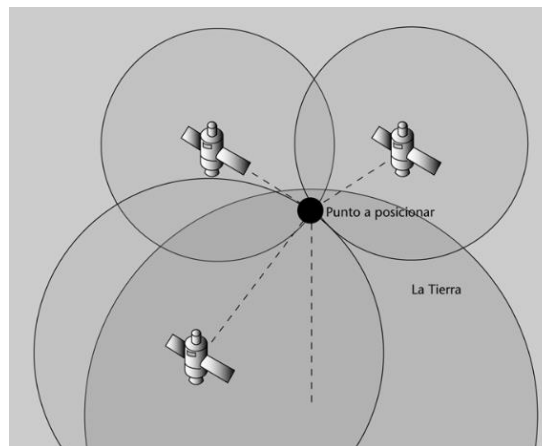


Ilustración 9: Localización de un punto en un GNSS. Fuente:

<http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/51541/1/Geotelem%C3%A1tica.%20Posicionamiento%20y%20navegaci%C3%B3n.pdf>

Para corregir posibles errores de medición a la hora de tener en cuenta el sincronismo, se añade un satélite más a la hora de calcular la posición, de modo que se pueda contrarrestar el retardo entre que se envía y se recibe la onda con el movimiento relativo entre el receptor en la Tierra y el satélite en órbita. De este modo, podemos

concluir que para obtener una localización óptima del receptor a nivel de usuario, debemos recibir de forma directa las señales de cuatro satélites.

Aun así, debido a la poca potencia de las ondas electromagnéticas enviadas y por las condiciones físicas del medio de propagación, las mediciones de posición pueden verse alteradas debido a diferentes causas:

- **Errores de reloj del satélite:**

Se deben a la diferencia de sincronización de los relojes atómicos de los satélites con respecto al patrón marcado con la estación central de control, ajustado a su vez por una red de relojes atómicos en tierra. También puede deberse a errores relativistas que provocan que los osciladores en tierra y en el satélite no oscilen igual. Como dijimos anteriormente, el satélite envía los datos de su reloj y son comparados en la central, enviando las correcciones al satélite.

- **Errores de órbitas:**

Mediante la posición deducida en las efemérides desde tierra y la posición recibida del satélite, se puede calcular el error de posición. A posteriori se pretende corregir calculando las posiciones futuras y así enviar la corrección, pero incluso con estas correcciones se provocan pequeños errores debido a la imposibilidad de saber exactamente la trayectoria futura. Además estos errores también son provocados por efectos gravitatorios.

- **Errores de reloj en receptores:**

Los relojes de los receptores son menos precisos que los de los satélites y están preparados para hacer una réplica de la señal en cuanto le llega, de modo que desde la recibe y empieza a simularla se produce un pequeño error temporal, que se produce igualmente para todos los satélites. Para compensarlo se utiliza un cuarto satélite. Asimismo los receptores corrigen su error cada segundo.

- **Efectos atmosféricos:**

La Ionosfera es la capa de la atmosfera donde se encuentran iones cargados por efecto de la radiación ultravioleta. En este entorno las señales enviadas sufren un retardo que puede ser mayor o menor en función de la actividad de la capa en distintas épocas del día y estaciones del año. Este retraso pueden corregirlo los receptores que puedan leer varias señales a la vez como la L1 y la L2 del sistema GPS, de modo que a la hora de compararlas se puede estimar el error de posición provocado por la capa y corregirlo en mayor o menor medida, ya que las dos señales están afectadas pero de distinto modo.

Igualmente se producen errores en la troposfera, capa que presenta los fenómenos meteorológicos y donde se mantiene la mayor parte del vapor de agua. En esta capa se producen retardos en la señal en función de la humedad, temperatura y presión atmosférica, pero como estas condiciones se suelen dar de forma similar en una zona local, pueden afectar tanto a dispositivos móviles como a dispositivos

de control, resultando sencillo compensar este error por métodos diferenciales, e incluso creando modelos de corrección para los receptores móviles para calcular la estimación de error y su corrección. Cabe decir también que los errores producidos por la concentración de vapor de agua son muy difíciles de eliminar, de modo que en un entorno seco es más sencillo corregir estos errores.

- **Efectos multitrayecto:**

En entornos urbanos suele ser común este tipo de problemas. Los efectos multitrayecto vienen dados por la recepción de una misma señal varias veces, debido a la reflexión de éstas en edificios, antenas, árboles, agua, mobiliario urbano, etc. La reflexión de la señal hace que la onda recorra más espacio, de modo que provoca un error temporal y el cálculo de la posición será erróneo. Para evitar este tipo de errores lo que se debe hacer es tomar medidas a cielo lo más abierto posible, lejos de estas superficies reflectantes, pero si no hay posibilidad de ello cobra importancia el tipo de antena y los materiales aislantes que tenga alrededor y en su diseño.

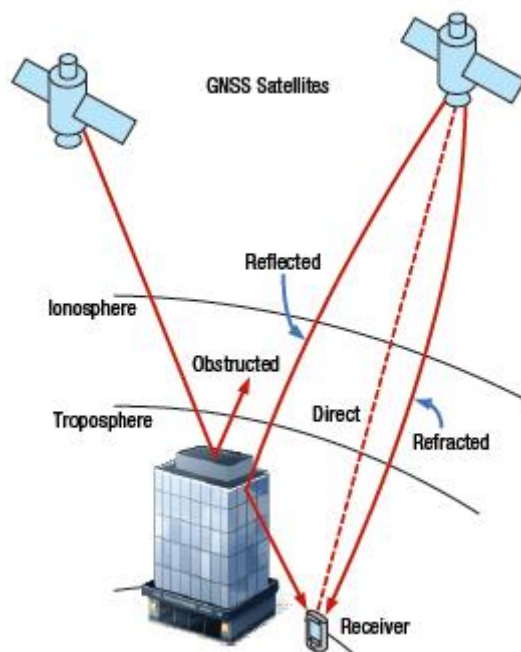


Ilustración 10: Errores provocados por el entorno en la recepción de señales. Imagen sustraída de [3]

Para solucionar estos errores se utilizan métodos multiconstelaciones, que permiten utilizar las distintas señales de los distintos sistemas GNSS en activo, así como métodos multifrecuenciales para recibir las distintas señales de estos sistemas, como el uso de las frecuencias L1 y L2 de GPS para corregir el error provocado en la ionosfera. Al mismo tiempo se pueden utilizar las instalaciones en tierra para contrarrestar los errores que se reciben desde el satélite, siendo estos métodos los llamados diferenciales. Además de instalaciones en tierra, la ayuda de sistemas de aumentación por satélites permite calcular una mejor ubicación del receptor.

Sin embargo, estos métodos de corrección están basados en la recepción de un número de señales. Para evitar esta dependencia también existen modelos inerciales (INS – *Inertial Navigation System*) que junto con el sistema GNSS puede ayudar a estimar la localización del receptor o navegador en entornos que tengan mala cobertura, como lo pueden ser en entornos urbanos.

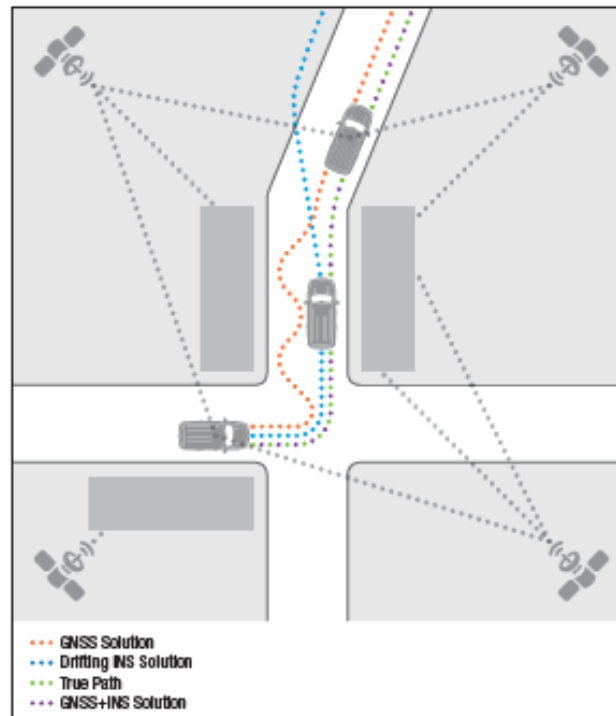


Ilustración 11: Ejemplo de corrección de señal con sistemas inerciales. Imagen extraída de [3]

2.2.2. Breve historia

El primer sistema GNSS en establecerse fue por parte de Estados Unidos el llamado NAVSTAR-GPS o simplemente GPS (siglas del inglés *Global Positioning System*) en los años 70 como uso exclusivo militar, permitiendo su uso civil a partir de 1983. Asimismo como contrarrespuesta en el marco de la Guerra Fría, la Unión Soviética lanzó el programa GLONASS, desarrollándose en los años 80 y que más adelante continuó Rusia, considerándose operativo en 1993 pero que entró en declive hasta que el gobierno ruso decidió modernizarlo. Debido a estos sucesos, el único sistema GNSS disponible durante varias décadas fue el sistema GPS estadounidense, dependiente del Departamento de Defensa de Estados Unidos, y que ha repercutido en que hasta la actualidad sea el más utilizado. Durante los años 90 se dedicaron a mejorar el sistema estableciendo centros de control en diversas partes del mundo y mejorando los sistemas de aumentación en distintas regiones, lo cual hizo que el resto de países se planteasen crear nuevos sistemas GNSS para no depender de país en el uso de esta tecnología, tanto en ámbitos civiles como militares.

Así pues, en el uso civil se establecieron una serie de planes de uso para estos sistemas GNSS:

- **Fase inicial**: Los satélites disponibles para su uso civil son las constelaciones GPS y GLONASS desarrollados desde los años 70.
- **GNSS-1**: Esta fase fue desarrollada del 2002 al 2015. Los sistemas utilizados seguían siendo el GPS y el GLONASS junto con sistemas de aumentación establecidos en aeronaves (ABAS), en tierra (GBAS) o mediante satélites geoestacionarios (SBAS). Además se empiezan a desarrollar el sistema GALILEO europeo, llevado a cabo por la Union Europea y la Agencia Espacial Europea (ESA) para uso civil, y el sistema BeiDou del gobierno Chino.
- **GNSS-2**: Esta es la actual fase, comenzada en 2015. Se pretende que el sistema esté compuesto con los sistemas actualizados de GPS y GLONASS así como que se sumen a ellos los sistemas GALILEO y BeiDou (operativos pero no completados hasta 2020) y además los sistemas QZSS japonés e IRNSS indio. Estos sistemas garantizarán una cantidad de señales que mejorarán la precisión de las posiciones en tiempo real y se puedan aplicar a servicios aeronáuticos y de salvamento entre otros⁷.

2.2.3. Actualidad de los sistemas GNSS

Como se ha enunciado en el apartado anterior, nos encontramos en la fase GNSS–2. En esta fase se pretenden actualizar los sistemas ya establecidos GPS y GLONASS así como completar los programas GALILEO y BeiDou y añadir los sistemas regionales de de Japón (QZSS) y de India (IRNSS).

⁷ “BERNÉ VALERI, J.L. [et al] (2014) *GNSS: GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática*. Valencia: Universitat Politècnica de València”, apartado 4.2: “El desarrollo de los sistemas GNSS”.

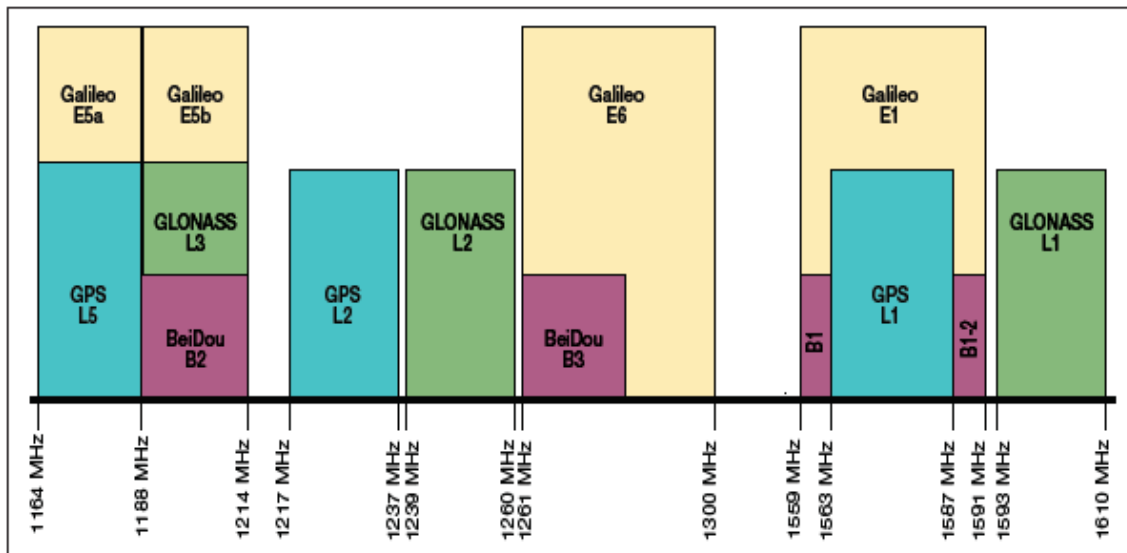


Ilustración 12: Bandas de señales GNSS cuando se modernicen los sistemas GPS y GLONASS y se finalicen los programas GALILEO y BeiDou para el año 2020 [3]

2.2.3.1. Sistemas plenamente operativos

2.2.3.1.1. Sistema GPS (Global Positioning System)

Como hemos contado anteriormente, hoy día es el sistema más utilizado. Puede ser utilizado en el ámbito militar y en el ámbito civil en todo el mundo. El sistema estadounidense lleva funcionando desde los años 70, para uso civil desde los 90, y sigue activo con mejoras en su funcionamiento (fase GNSS-2) y con ayuda de sistemas de aumentación:

- Segmento espacial: Consta de una constelación de 27 satélites operativos y 4 de repuesto repartidos en 6 planos a 21200 Km de distancia, orbitando prácticamente de forma circular. Cada uno tarda en completar una órbita 12 horas, garantizando un mínimo de 6 satélites en contacto a cielo abierto.

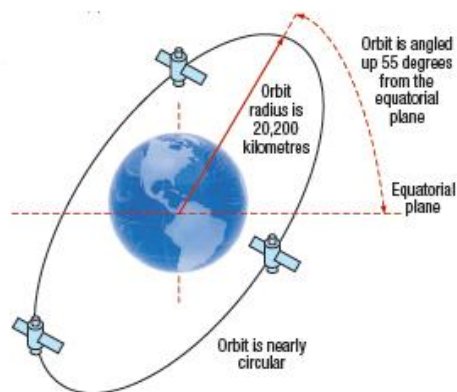


Ilustración 13: Modelo de órbita GPS [3]

- Segmento de control:

Se compone de una Estación de Control Maestra junto con otra de respaldo, de 16 estaciones de monitorización alrededor del mundo, de antenas en tierra y de estaciones de seguimiento remoto.

El funcionamiento de estas infraestructuras consiste en seguir continuamente los satélites mediante las estaciones de monitorización, las cuales los monitorizan con la información de reloj, posición de efemérides y almanaque⁸. Esta información se envía a la estación de control maestra en la cual se encargan de utilizar estos datos para recalcular las nuevas trayectorias y corregir los posibles errores de posición de efemérides y de sincronización del reloj, enviando dichas correcciones mediante estaciones de envío de datos. Las antenas en tierra son las que comunican las estaciones de monitoreo junto con la estación de control maestra.

- Señales:

Las señales enviadas están basadas en el código pseudoaleatorio enviado por cada satélite. Contaba con dos bandas frecuenciales L1 (uso civil y militar) y L2 (uso civil), pero con la mejora van a añadirse tres señales más: L5 a partir de 2021, L1C a partir de 2016 y L2C desde 2018. Todas estas señales serán de uso civil y destinadas a mejorar las correcciones frente a la Ionosfera y a interferencias así como dar mayor redundancia de información para mejorar la localización. Para ver las frecuencias de emisión ver *ilustración 12* y para información más detallada y actualizada sobre los las señales existentes y futuras de GPS consultar “la Navipedia” (https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Signal_Plan - página web en inglés de la Agencia Espacial Europea - ESA)

2.2.3.1.2. Sistema GLONASS

Al igual que el sistema GPS, GLONASS nació con uso exclusivamente militar en la década de los 70. Tras los problemas económicos que tuvo Rusia, en los años 2000 se mantuvieron las instalaciones en vista a mejorarlas, y en el año 2007 se lanzó un programa de mejora y modernización del sistema, siendo hoy día una alternativa más al GPS estadounidense y obteniendo una precisión muy cercana a éste.

- Segmento espacial: Su constelación consta de 24 satélites operativos y 3 de reserva repartidos en 3 planos de 64’8 grados a 19140 Km de altura. Los satélites operan de forma complementaria separados 180 grados, lo que les permite emitir en la misma frecuencia, utilizando 12 frecuencias y se garantiza un mínimo de 4 satélites a cielo abierto dando una vuelta completa cada 8 días.

⁸ Por almanaque se entiende a los datos de registro de dicho satélite: referencia de satélite, datos de reloj, de posición, etc.

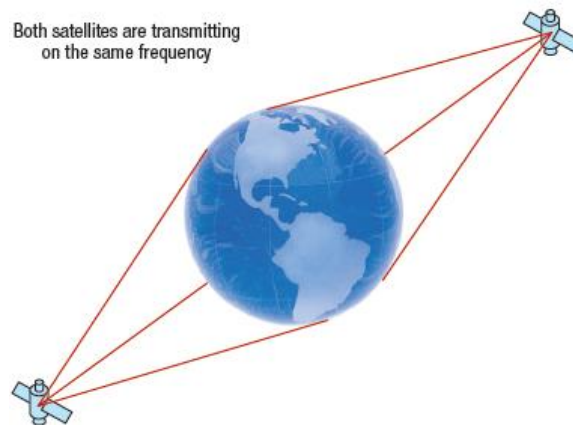


Ilustración 14: Modelo de órbita GLONASS [3]

- Segmento de control: Se forma de una red de estaciones de seguimiento conectadas a un centro de control principal. Desde las estaciones de seguimiento se monitorizan y se reciben los datos de efemérides, de reloj y del estado de los satélites que se transmiten al centro de control. Las correcciones se envían a los satélites dos veces al día.
- Señales: Como dijimos anteriormente y se puede ver en la *ilustración 14*, para 24 satélites orbitando de forma complementaria a 180 grados, se forman 12 parejas de satélites que pueden utilizar las mismas frecuencias, ya que nunca se van a mezclar. A diferencia del GPS, que sus mensajes están basadas en un mensaje de código pseudoaleatorio, todos los satélites envían el mismo código pero a distintas frecuencias.

Las señales están repartidas en dos bandas de frecuencias L1 y L2. Con los nuevos grupos de satélites que se están enviando se prevé que se añadan nuevas señales L3 (con interoperatividad con GALILEO y GPS⁹), L1CDMA y L2CDMA, y L5, pero estos programas están en proceso y aún no están plenamente operativos. En la *ilustración 12* se puede observar las frecuencias GLONASS en el conjunto GNSS. Para más información y detalles sobre estas señales consultar “la Navipedia” (https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Signal_Plan - página web en inglés de la Agencia Espacial Europea - ESA)

⁹ “The first block of GLONASS-K satellites (GLONASS-K1) will broadcast the new civil signal, designated L3, centered at 1202.025 MHz. Unlike the existing GLONASS signals, L3 is based on CDMA which will ease interoperability with GPS and Galileo.”[3]

2.2.3.2. Sistemas en proyecto

2.2.3.2.1. Sistema GALILEO (Europa)

El programa GALILEO fue planteado por la Unión Europea en los años 90 y desarrollado en la última década para establecer un sistema de navegación por satélite de cobertura global para no depender de estos servicios de Estados Unidos. Se encuentra operativo desde 2016¹⁰ pero se espera que se complete el programa en 2020 y el sistema está destinado a usos civiles.

- Segmento espacial: Según la información proporcionada por el Centro de Servicio GNSS Europeo, cuando se complete el programa en 2020 tendrá plenamente operativos 30 satélites, de los cuales 6 serán de reserva¹¹. Los satélites están dispuestos en 3 órbitas con una inclinación de 56 grados a 23220 Km.
- Segmento de control: Hay dos Centros de Control de GALILEO (GCC) en Europa, de los cuales uno está dedicado a control y mantenimiento (*Ground Control Segment – GCS*) y otro dedicado a misiones (*Ground Mission Segment – GMS*), y se encuentran en contacto con treinta estaciones de monitorización (*Galileo Sensor Station*) que les proporciona la información de los satélites en tiempo real. Al igual que los sistemas anteriores, la información es procesada en los centros de control para comprobar y corregir las trayectorias y el reloj de los satélites y enviarles estas correcciones mediante estaciones de envío de datos.
- Señales: El sistema tiene distintas frecuencias de funcionamiento en las que se dividen según sean para uso público, tareas de rescate o tareas comerciales. Las señales que se envían también utilizan código pseudoaleatorio, aunque dependiendo de las bandas pueden enviarse otro tipo de mensajes encriptados. Cabe decir también que GALILEO y GPS utilizan bandas en común y son compatibles, pudiendo mejorar así el servicio. Para ver las bandas de frecuencias en el entorno GNSS ver *ilustración 12* y para más información sobre sus señales consultar “la Navipedia” (https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Signal_Plan - página web en inglés de la Agencia Espacial Europea – ESA)

2.2.3.2.2. BeiDo (China)

El programa chino busca conseguir un sistema de navegación global con apoyo de sistemas de aumentación regionales para uso civil y militar. Así pues, la primera fase comenzó en 2012 centrándose en la región Asia-Pacífico enviando 5 satélites geostacionarios (GEO), 5 de órbita geosíncrona inclinada (IGSO) y 4 de órbita media

¹⁰ Web de la Comisión Europea (en inglés) - <http://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/> : “On 15 December 2016, the Declaration of Initial Services marked the beginning of Galileo’s operational phase. This means that anyone with a Galileo-enabled device is now able to use signals provided by Galileo’s global satellite constellation for positioning, navigation and timing.”

¹¹ Web del Centro de Servicio GNSS Europeo - <https://www.gsc-europa.eu/galileo-gsc-overview/system> : “The Galileo space segment, once fully deployed, will include a constellation of a total of 30 Medium Earth Orbit (MEO) satellites, including 6 spares, in a so-called Walker 24/3/1 constellation.”

(MEO). Su segunda fase consiste en conseguir una cobertura global enviando nuevos satélites de media órbita para acabar finalmente en su segmento espacial 5 satélites geoestacionarios, 3 de órbita geosíncrona inclinada y 27 de órbita media, completándose el proceso en 2020.

El segmento de control es parecido a los demás GNSS, componiéndose de un centro de control principal que recibe y envía las correcciones con la información recibida de los satélites de lo que esperan que sea una red de hasta 150 estaciones de referencia.

En cuanto a las señales del BeiDo también están basados en el código pseudoaleatorio como GPS y GALILEO y tiene tres bandas: B1 y B2 para servicios públicos y restringidos, y B3 para servicios restringidos. Si se utiliza de forma pública el servicio será gratuito pero con una precisión de 10 metros, mientras que si se paga licencia se obtendrá una precisión de hasta 2 metros.

2.2.3.3. Otros sistemas en proyecto: QZSS e IRNSS

2.2.3.3.1. QZSS (Japón)

El sistema QZSS es un sistema de navegación regional japonés cuyos segmento espacial lo componen tres satélites de órbita geoestacionaria inclinada (*IGSO*) y un cuarto satélite geoestacionario (*GEO*) a la altura del ecuador. Este sistema es muy preciso, llegando a una precisión hasta 3 centímetros y proyectado a mejorar el posicionamiento en grandes ciudades. En cuanto a sus señales utilizadas, este sistema trabaja en las mismas bandas L1, L2 y L5 de GPS, siendo también con este sistema.

2.2.3.3.2. IRNSS (India)

Este sistema de navegación por satélite indio se pretende utilizar en el ámbito militar y también en el civil y solo proporcionará cobertura a nivel regional y hasta 1500 Km alrededor de sus fronteras. Este sistema es autónomo del GPS y su proceso terminó en 2016. Su segmento espacial lo componen 7 satélites, siendo 3 geoestacionarios y 4 geoestacionarios con órbita inclinada. Envía una señal militar y otra civil en las bandas S y L5 consiguiendo una precisión de hasta 10 metros.

2.2.3.4. Sistemas de Aumentación regionales

Los sistemas de aumentación están destinados a dar mejor información sobre un entorno en concreto con la intención asistir a los sistemas GNSS y corregir sus errores de posición. Estos sistemas pueden ser de tres tipos:

- 1) Basados en Satélites (SBAS): formados principalmente por satélites geoestacionarios para mejorar la cobertura en áreas grandes.
- 2) Terrestres (GBAS): utilizados para mejorar la localización en áreas pequeñas como alrededores de aeropuertos. Funcionan con ondas UHF.
- 3) Aéreos (ABAS): utilizan sensores en aeronaves.

En cuanto a los sistemas que nos interesan conocer para ayudar a los sistemas GNSS son los Sistemas de Aumentación Basados en Satélites, que cubren ciertas regiones para mejorar las correcciones diferenciales de posición así como de reloj y retardos provocados por la atmosfera gracias a que siempre se mantiene fija con respecto a la superficie de la Tierra. Estos sistemas regionales se reparten en función de necesidades de países (como el WAAS norteamericano o el SDCM ruso) o tratados firmados por un conjunto de ellos como es el caso de EGNOS en Europa. En la *ilustración 15* podemos ver la distribución de estos sistemas en sus respectivas zonas.

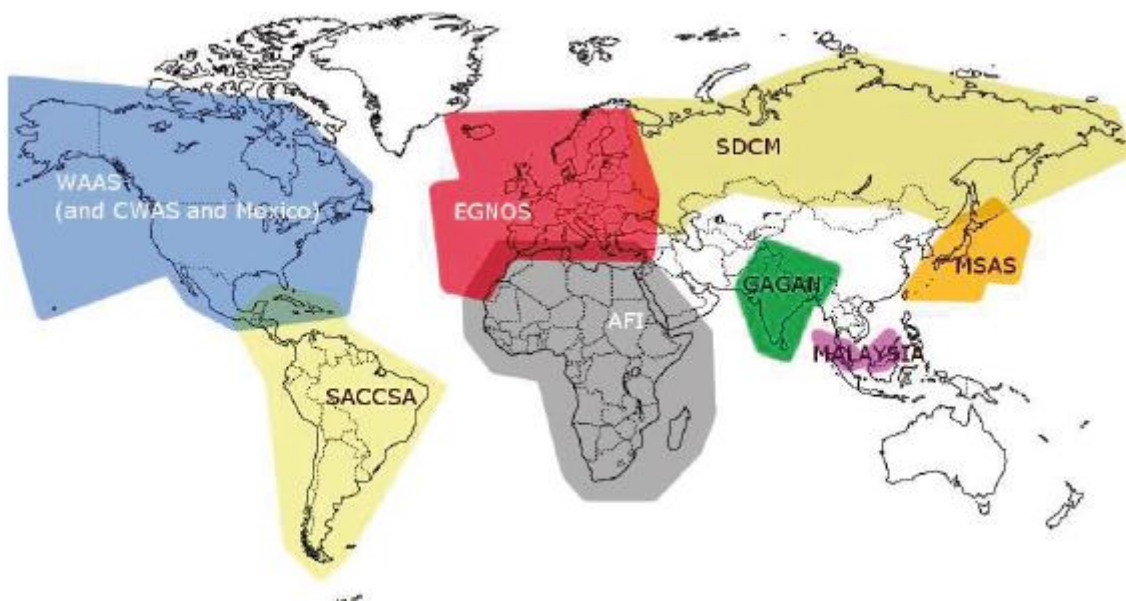


Ilustración 15: Sistemas de Aumentación SBAS repartidos en el mundo

2.2.4. Georreferenciación de los sistemas GNSS

Los distintos sistemas GNSS trabajan respecto a unos sistemas de coordenadas distintos. La forma de representar una localización sobre la superficie terrestre podemos hacerla mediante sistemas de coordenadas geográficas o mediante sistemas de

coordenadas proyectadas. Los sistemas GNSS suelen trabajar con coordenadas geográficas, más concretamente el sistema WGS84 para GPS y el ETRS89 para Europa (GALILEO), pero a nivel de aplicaciones este tipo de coordenadas pueden resultar poco útiles, por lo que los dispositivos GNSS suelen convertir estas coordenadas a coordenadas proyectadas UTM. En este apartado se pretende explicar brevemente la utilización de estos sistemas de georreferenciación de la superficie terrestre.

2.2.4.1. Coordenadas geográficas clásicas

Las coordenadas geográficas pretenden definir un punto en la superficie terrestre estableciendo como ejes principales el Meridiano de Greenwich que corta en ángulo recto a la línea del Ecuador. A la hora de establecer una posición se establece en grados sexagesimales la latitud y la altitud a modo de coordenadas polares que establecen su origen de coordenadas en el centro de la Tierra:

- **Latitud:** establece los hemisferios norte y sur, estableciendo su origen en el ecuador como paralelo 0° y estando el polo norte a 90° Norte y el polo sur a 90° Sur. Asimismo un grado está dividido en 60 minutos, y éste está dividido en 60 segundos.
- **Longitud:** establece los hemisferios este y oeste estableciendo su origen en el Meridiano de Greenwich como meridiano 0° y considerando su antimeridiano a 180° , de modo que si nos movemos a regiones del oeste será por ejemplo 20° Oeste y hacia el este será 20° Este. Asimismo un grado está dividido en 60 minutos, y éste está dividido en 60 segundos.
- **Altura:** representa la altura con respecto al nivel del mar. Dependiendo de los mapas, esta unidad se incluye o no.

2.2.4.2. Coordenadas geográficas utilizadas en GNSS

2.2.4.2.1. GPS – Coordenadas WGS84

El sistema GPS funciona en base al sistema de coordenadas WGS84 (*World Geodetic System 1984* – Sistema Geodésico Mundial de 1984). Este sistema se realizó por el servicio geográfico de la armada estadounidense ayudado ya con el sistema GPS en marcha, obteniendo la información de la superficie terrestre mediante efecto Doppler y posteriormente refinando los datos, de modo que se puede refinar y aproximar de modo sucesivo ya que se consideran los satélites orbitando de forma circular sobre el centro de la tierra como origen de coordenadas.

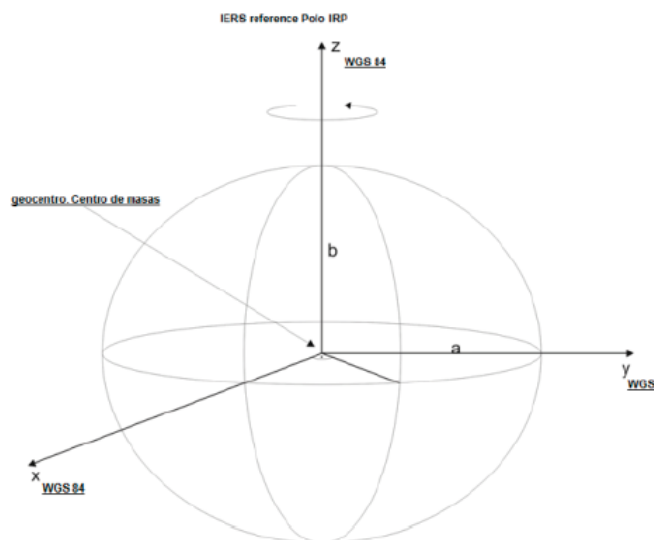


Ilustración 16: Sistema WGS84

Del sistema de obtiene como referencias:

- El origen del sistema es coincidente con el centro de masas de la Tierra (con un error de aproximación de $\pm 2\text{m}$).
- El eje Z es coincidente con la dirección del polo al centro de la tierra en 1984.
- El eje X es coincidente con la intersección del plano del Meridiano de Greenwich y el ecuador.
- El eje Y es ortogonal a los ejes X y Z definidos anteriormente.

Estableciéndose asimismo que:

- Semieje mayor de la Tierra (radio ecuatorial): 6378137m
- Semieje menor de la Tierra (distancia a los polos): 635672.3142m

2.2.4.2.2. GLONASS – PZ-90

PZ-90 es el sistema de coordenadas geográficas creado en Rusia con ayuda de la constelación GLONASS del mismo modo que se creó el sistema WGS84. Con la modernización del sistema, la última actualización del sistema es el 90.02PZ sobre el que ya funciona la totalidad de GLONASS. Este sistema de referencia apenas difiere a efectos prácticos del WGS84.

2.2.4.2.3. GALILEO – Coordenadas ETRS89

El sistema ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*) fue creado basándose en el movimiento de la placa tectónica continental europea, y con un elipsoide de referencia compatible con el WGS84. Este sistema se adoptó como regulación del sistema geodésico de referencia en la mayoría de los países europeos, de modo que este sistema también es utilizado por GALILEO. Este sistema difiere del WGS84 en que se

tiene como referencia el movimiento de la placa Euroasiática, de modo que puede haber diferencias entre un modelo y otro de centímetros.

2.2.4.3. Coordenadas proyectadas UTM

Como hemos visto anteriormente, los sistemas geográficos se basan en modelar la Tierra como una esfera e intentar refinar estos resultados hasta conseguir un modelo aproximado de la superficie terrestre. Sin embargo a la hora de establecer la esfera terrestre sobre un plano sigue habiendo dificultades a la hora de establecer un mapa lo más exacto posible sobre coordenadas cartesianas. Para ello se utilizan los sistemas de coordenadas proyectadas, que se sirven de proyecciones de regiones.

El sistema de proyección transversal de mercator UTM (*Universal Transverse Mercator*) es un sistema basado en la proyección cilíndrica de la esfera terrestre.

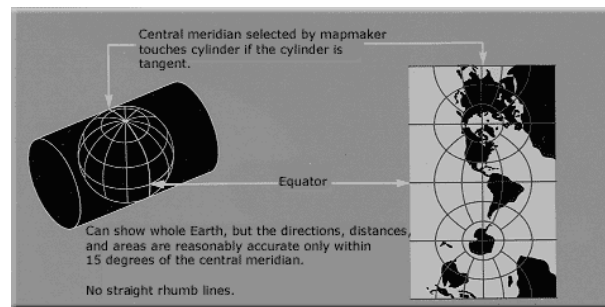


Ilustración 17: Proyección de Mercator de la superficie de la Tierra dibujada sobre una superficie cilíndrica. Fuente: Wikipedia - Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=61911>

Este sistema tiene la ventaja de poder asemejar la superficie de la Tierra en una cuadrícula y que cada una de ellas se le pueda poner un sistema de coordenadas específico de la región. Aun así la ventaja más importante de este sistema es que nos permite utilizar las distancias en metros estableciendo de referencia el ecuador y el Meridiano de Greenwich como ejes de ordenadas y de abscisas respectivamente, basándonos en el sistema WGS84.

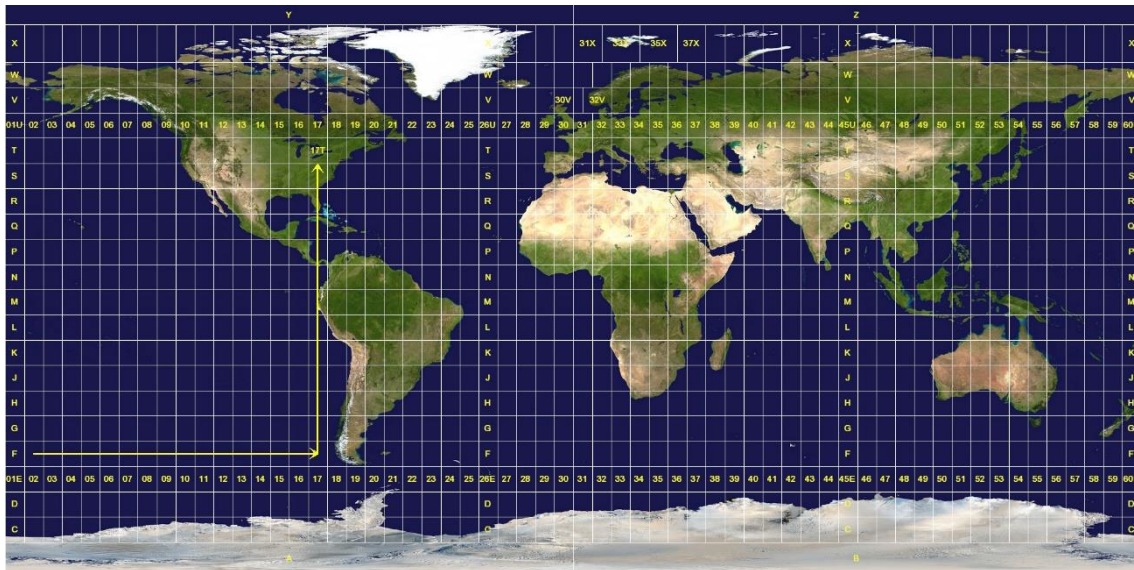


Ilustración 18: Cuadrícula del planeta dividido en sus correspondientes zonas. Fuente: Wikipedia - Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1601744>

A la hora de localizar un punto, deberemos decir la cuadrícula en la que nos encontramos, las coordenadas en metros y el datum¹² que utilizamos, siendo normalmente el WGS84, pero pudiéndose aplicar otros sistemas de coordenadas locales.

¹² Datum es el sistema de coordenadas de referencia empleado.

Capítulo 3. Curvas de Bézier

3.1. Introducción

Las curvas de Bézier son un tipo de curvas desarrolladas en la década de los 50 y los 60 por el ingeniero francés Pierre Bézier en el entorno de la industria automovilística a la hora de mejorar sus diseños.

Este tipo de curvas están basadas algoritmo de Casteljau, ingeniero que se dedicó a desarrollar estas curvas matemáticamente en base a los polinomios de Bernstein, de modo que las curvas de Bézier se dibujan matemáticamente utilizando de forma iterada estos polinomios.

En la actualidad las curvas de Bézier se han convertido en una herramienta útil y muy utilizada por los programas de diseño asistido por ordenador (CAD), siendo muy empleadas en los campos de diseño industrial, sobretodo en la industria aeronáutica y naval.

3.2. Curva de Bézier

El objetivo de estas curvas es unir dos puntos por medio de una forma suave cercana a unos puntos de control, de modo que nos quede una figura curva si unimos los puntos de los segmentos que forman dichos puntos de forma reiterada. Los puntos auxiliares junto con los puntos iniciales y final, en los que comienzan y acaban las curvas, forman un llamado polígono de control.

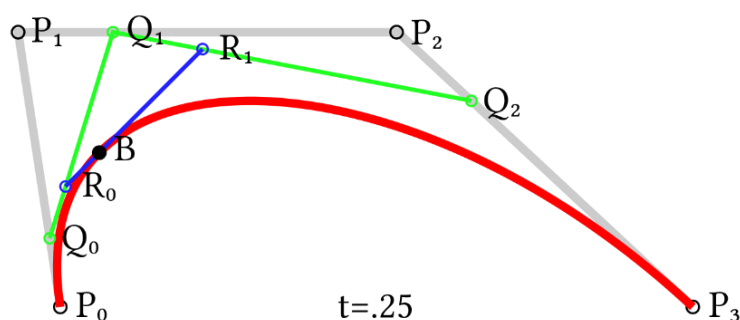


Ilustración 19: Curva de Bézier, dibujada de unir sucesivamente, en orden, los distintos puntos de los segmentos que forman el polígono de control. Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Curva_de_B%C3%A9zier

La expresión de los puntos que forman la curva viene dada por la siguiente expresión de Casteljau:

$$c(t) = \sum_{i=0}^n P_i \cdot B_{i,n}(t)$$

Siendo:

- P_i : los puntos que conforman el polígono de control.
- $B_{i,n}$: el polinomio de Bernstein de grado n
- t : parámetro de 0 a 1
- n : es el grado de la curva, coincidiendo con el número de segmentos del polígono de control.

Como vemos en la expresión, para construir la curva el algoritmo de Casteljau emplea el polinomio de Bernstein para definir la curva, siendo la siguiente expresión el polinomio de Bernstein para grado n :

$$B_{i,n}(t) = \binom{n}{i} \cdot t^i \cdot (1-t)^{n-i} \quad t \in [0,1]$$

Recordando que los números combinatorios son: $\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$

Este tipo de curvas pueden aproximarse todo lo que se requiera según los valores que se le asignen a t , siendo comprendidos siempre entre 0 y 1. Una ventaja de esto es que matemáticamente se cumple que para $t = 0$ el punto se encuentra en el punto P_0 inicial, y para $t = 1$ se encuentra el punto final P_n , teniendo en cuenta que $i \in [0, n]$ en la expresión.

Ejemplo, para grado $n=3$:

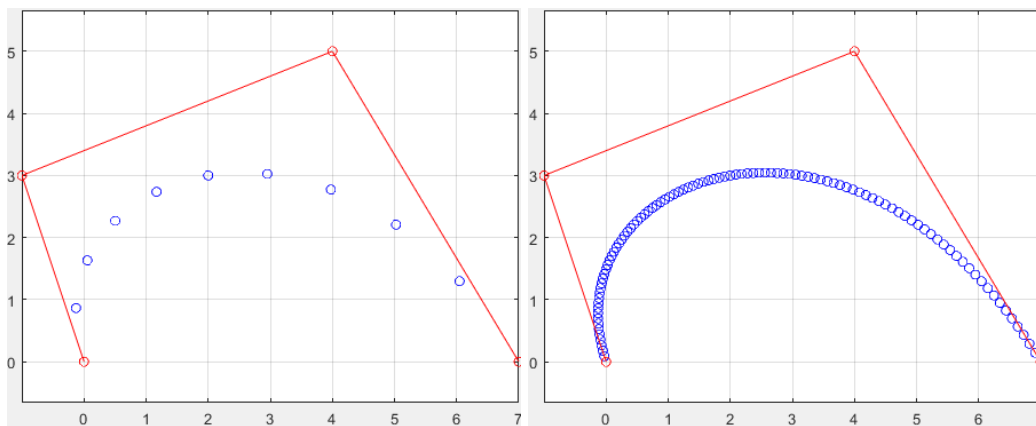


Ilustración 20: Imágenes para t aumentando cada 0.1 y para t aumentando cada 0.01 respectivamente

Esto resulta muy útil sobretodo a la hora de querer saber un punto de la curva en función de éste parámetro, pudiendo aproximarse infinitas veces. Al mismo tiempo cada segmento final que marca el punto de la curva, es precisamente su derivada la derivada de la curva en dicho punto.

3.3. Tipos de curva de Bézier

Como hemos visto anteriormente, las curvas de Bézier son un tipo de curva suave que une dos puntos inicial y final mediante puntos auxiliares, formando en conjunto un polígono que engloba un área de control. Estas curvas van marcadas por un determinado grado “n” que distingue a cada curva, por lo que podemos diferenciarlas según su grado.

3.3.1. Curva de Bézier lineal

Una curva de Bézier de grado $n=1$ forma una línea que une dos puntos en forma de recta. Para que esto se lleve a cabo estrictamente tienen que estar el punto inicial y el final en el mismo plano y recta.

3.3.2. Curva de Bézier cuadrática

Las curvas de Bézier de grado $n=2$ forman una curva con un punto auxiliar entre los puntos iniciales y finales.

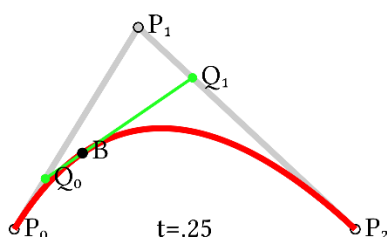


Ilustración 21: Curva de Bézier de grado 2. Fuente: De Jc86035 - Bézier 2 big.png, by Phil Tregoning (Twirlip), Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31987517>

3.3.3. Curva de Bézier cúbica

Las curvas de Bézier de grado $n=3$ se sirven de 2 puntos auxiliares para unir los puntos inicial y final.

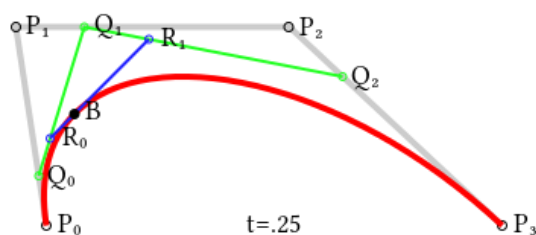


Ilustración 22: Curva de Bézier de grado 3. Fuente: De Chris828 (talk) 22:39, 29 May 2009 (UTC) - file:Bezier_3_big.png, Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6898029>

3.3.4. Curva de Bézier de órdenes superiores

En función del número de n rectas que unan los puntos iniciales y finales con ayuda de los puntos auxiliares y que en conjunto forman el polígono de control, el grado será de grado n .

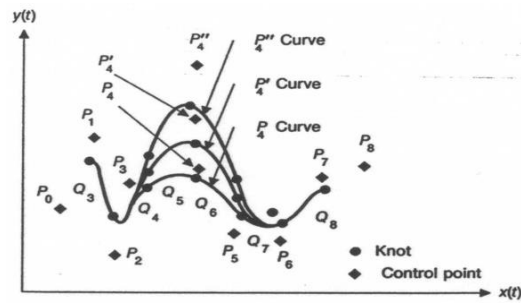


Ilustración 23: Cambio de las curvas en función de los puntos que forman el polígono de control. Fuente: <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8625.pdf>

Al mismo tiempo, como se puede ver en esta imagen las curvas variarán su recorrido en función de las posiciones que tomen estos puntos auxiliares.

Capítulo 4. Aplicación de las curvas de Bézier para trayectorias GNSS

4.1. Motivaciones

Como hemos comentado a lo largo del trabajo varias veces, el objetivo de éste proyecto es aplicar las curvas de Bézier en entornos urbanos e interurbanos para mejorar así las trayectorias que deben de seguir los vehículos autónomos, procurando que estas se parezcan lo más posible a una trayectoria real de un vehículo en movimiento.

Así pues, una de las primeas ideas que se pueden tener para guiar a los vehículos es la de emplear plataformas como Google Maps, OpenStreetMap, o incluso aplicaciones menos conocidas como la Vía Michelin o la propia DGT. Estas plataformas, mediante algoritmos inteligentes, utilizan bases de datos tanto de cartografía como en tiempo real del estado de las carreteras para proporcionar una serie de rutas para desplazarse desde un lugar a otro, por lo que de primera impresión puede ser bastante útil a la hora de cargar la ruta en el vehículo para que pueda seguirlo. Además estas aplicaciones aportan de forma más rápida las coordenadas de los caminos a seguir.

Aun así pueden producirse errores por parte de estas plataformas como:

- Falta de actualización de las bases de datos: que impidan un conocimiento óptimo de las carreteras como los sentidos de circulación, nuevos tramos, tramos en obras o arregladas que hayan variado su estado y recorrido y no estén debidamente registradas, etc.
- Errores en los algoritmos: que pueden venir también causados por lo anterior y que no permitan una ruta óptima.

Suponiendo igualmente que por parte de éstas plataformas los caminos que se proponen al usuario son correctos, a nivel de calzada podemos encontrarnos problemas debido a que las rutas pueden no seguir estrictamente la carretera o carriles deseados.



Ilustración 24: Trayectoria proporcionada por Google Maps. Nótese que la trayectoria marcada no corresponde ni con las líneas de la calzada ni con una trayectoria real de un vehículo. Fuente: Google Maps - <https://www.google.com/maps/>

Como podemos ver en la *Ilustración 24*, estas trayectorias no siempre son acordes con el propio trazado de la carretera, y además no permiten hacer un giro correcto en las curvas a la hora de cambiar de calle. Para ello se propone el uso de la curva de Bezier para mejorar las trayectorias, sobretudo a la hora de realizar el trazado de las curvas para que así los vehículos tengan un mejor conocimiento del camino que deben seguir junto con la información del entorno recibida con las tecnologías ADAS.

4.2. Muestras de aplicaciones de la curva de Bézier

A la hora de observar los trazados de las carreteras podemos observar distintas aplicaciones para distintos trazados de carreteras:

- Grado $n=1$: para rectas.
- Grado $n=2$: para rectas¹³ y curvas o trazados con giros de hasta 90° .
- Grado $n=3$: para curvas o trazados con giros de 90° a 180° o incluso de 180° a 270° .
- Grado $n=4$: para curvas o trazados de 180° a 360° .

Estas pautas son orientativas. Con una curva de orden 4 también podemos hacer una curva que permita un giro de 90° , pero muchas veces es innecesario. Al mismo tiempo con una curva de orden 2 también se pueden aplicar correcciones de giros mayores de 90° , como podremos ver en ejemplos más adelante (ver Capítulo 5).

¹³ A nivel de plano, las rectas pueden no ser líneas con una dirección única, de modo que una pequeña variación en el trazado puede obligarnos a aplicar una curva de grado 2 con poco giro.

4.3. Propuesta de soluciones para mejorar las trayectorias GNSS.

4.3.1. Explicación de la obtención de trayectorias

Como hemos podido observar en el apartado 4.1, las aplicaciones que nos proporcionan rutas para ir de un lugar a otro no siempre son correctas como para que un vehículo autónomo las siga como posiciones precisas con cierto grado de error. Asimismo y como complemento a la información de los sistemas ADAS, la aportación de una trayectoria lo más realista posible a un vehículo en movimiento, ayudará a la redundancia de información en la que se basa el sistema de los coches autónomos para moverse de forma segura.

Para ello, una forma de conseguir los datos de una trayectoria lo más exacta posible es recorrer previamente las carreteras por las que debe moverse con un receptor GNSS, de forma que continuamente se registren las coordenadas por las que pasa, y en consecuencia, discurre la carretera realmente.

Pero no siempre todos los datos recogidos por navegación por satélite van a ser correctos. Como se cuenta en el apartado 2.2 del *Estado de la cuestión*, las señales de los satélites pueden verse interferidas dependiendo de los medios por los que discurra la onda, por lo que aunque haya correcciones de las señales por las condiciones atmosféricas, en entornos en los que las señales se vean reflejadas será complicado que se registren sin grandes errores, por no decir que cuando hay calles estrechas o se pasan bajo puentes o por túneles, puede empeorar la cobertura o incluso la pérdida de señales de los satélites.

En el apartado siguiente se propone un método para que, una vez obtenidas las trayectorias, se pretendan arreglar o mejorar estas trayectorias, sobretodo en zonas de curvas.

4.3.2. Observaciones de aplicabilidad de las curvas.

Observando las trayectorias obtenidas se puede deducir que prácticamente todas las correcciones son de orden 2, ya que a la velocidad a la que se recogen los datos¹⁴ y al diseño de los trazados tanto interurbanos como urbanos, los errores cometidos suelen ser de pequeños tramos incluso para curvas, considerándose prácticamente innecesarias el uso de curvas de mayor grado. Esto facilita bastante el trabajo a la hora de aplicar y solucionar los trayectos de las curvas, evitando complicaciones a la hora de aplicar curvas de orden superior que, en base a los datos ofrecidos, puede resultar complicado de aplicar de forma automática.

¹⁴ Los datos recogidos por el receptor son del orden de décimas de segundo.

Además, se pretende corregir los errores de trayectoria, no rediseñar la carretera. Una eliminación de grandes cantidades de puntos de la trayectoria puede suponer que se pierda información y que como consecuencia los tramos obtenidos difieran de la realidad.

Cabe decir también que con las curvas de Bézier se pretende dibujar las trayectorias que deben de seguir los vehículos, por lo que debe de ser suficiente, como comprobaremos en los siguientes apartados, y no aplicar técnicas que se utilizan para diseñar carreteras que nos pueden llevar a cálculos complicados o errores, como lo son las clotoideas.

4.3.3. Modelo propuesto aplicado a la obtención de curvas.

Previamente a desarrollar cualquier tipo de idea, se observó detenidamente los distintos tramos de las trayectorias, observándose lo siguiente:

- Los trazados por vías rápidas, que engloban tanto a calles y avenidas principales como a tramos interurbanos, son los más estables en cuanto a la calidad de su trayectoria, viéndose errores notables debido a la presencia de puentes en nudos de carreteras en los que se pierde totalmente la señal y por el entorno urbano que puede provocar reflejos de las ondas provocando pequeñas variaciones.
- Los trazados de zonas muy urbanizadas, sobretudo en calles estrechas con edificios altos, se producen grandes errores que distorsionan bastante la trayectoria. Esto puede deberse, además de posibles reflejos de ondas, a que directamente no lleguen las señales suficientes como para calcular de forma óptima la posición.
- Debido a la alta velocidad con la que se recogen los datos, en muchas ocasiones se observan que, en un punto claramente erróneo, se aprecian pequeñas desviaciones de posición en los puntos anteriores y también en los puntos superiores de forma clara, por lo que esto nos obliga a no tener en cuenta cierta cantidad de puntos antes y después del tramo a corregir y, como veremos a continuación, se deban de tener en cuenta distintos criterios a la hora de aplicar las curvas de Bézier, sobretudo en tramos con muchos errores.
- La trayectoria esta recogida desde un vehículo en movimiento, por lo que no es una trayectoria limpia marcada por una sucesión de puntos, sino que a veces debido al tráfico se pueden recoger muchos puntos en distancias muy cortas, provocando que aparezcan muchos puntos en la misma posición o con distancias relativamente despreciables.

Teniendo en cuenta estas observaciones, procedemos a aplicar el siguiente método:

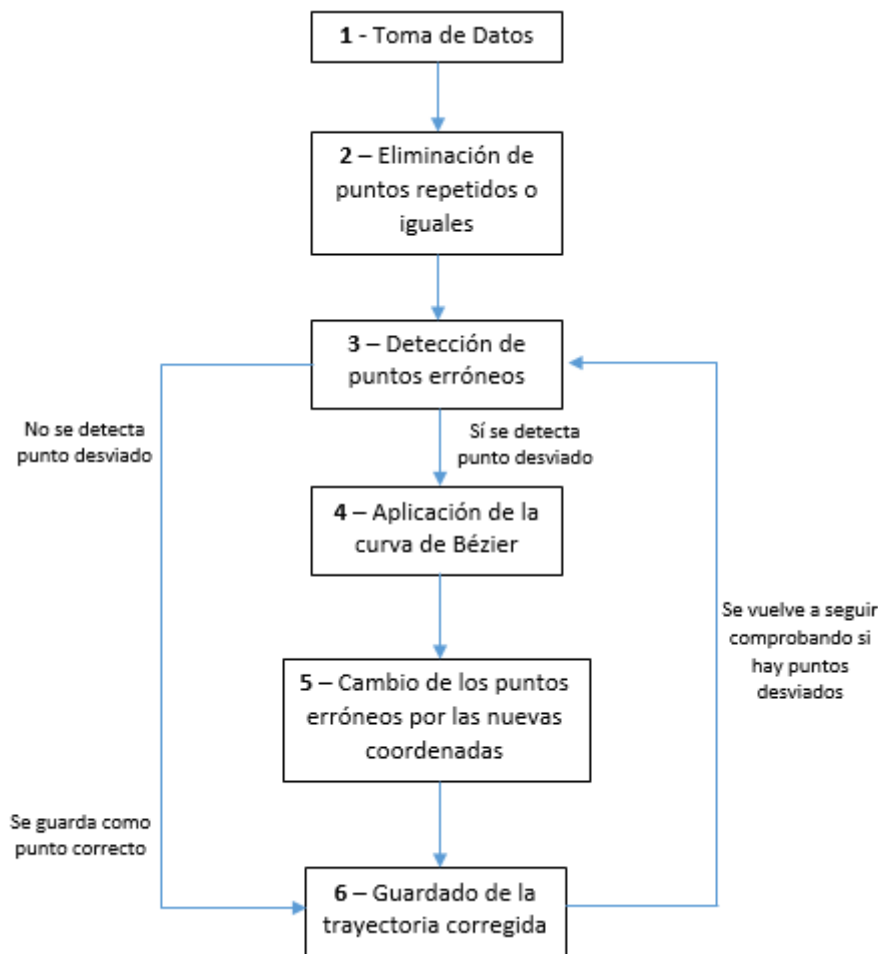


Ilustración 25: Diagrama de funcionamiento del algoritmo

- 1) **Toma de datos:** Los datos que se obtienen realizando previamente el recorrido se permiten descargar del navegador GPS mediante un archivo de texto. Posteriormente se cargan al ordenador aquellos que nos interesan y trabajaremos en el entorno de programación que se vaya a utilizar, en nuestro caso Matlab.
- 2) **Eliminación de puntos que sean iguales:** Como hemos dicho antes, puede haber puntos que sean iguales por motivos tanto de pérdida de cobertura como por paradas del vehículo en semáforos, stops, etc. Este filtrado permite que la trayectoria sea más clara y los datos más fáciles de procesar.
- 3) **Detección de puntos erróneos:** Los puntos desviados se pueden detectar de varias formas. Para ello en este trabajo se propone lo siguiente:
 - **Por cambios de pendientes:** trata de detectar un punto erróneo en base a cambios bruscos en las pendientes de los segmentos formados punto a punto
 - **Por cambios de ángulos:** que a su vez se puede realizar de dos modos:

- **Mediante los datos del navegador:** el propio navegador puede proporcionarnos los datos de la dirección o rumbo a la que se dirige el vehículo.
- **Mediante coordenadas polares:** se convierten los segmentos formados punto a punto en módulo y ángulo, de modo que se puedan detectar los puntos erróneos con cambios bruscos en sus ángulos de dirección.

4) **Aplicación de la curva de Bézier:** Para aplicar la curva se propone lo siguiente:

- 1) Eliminar los puntos anteriores y posteriores al punto detectado como erróneo, de modo que de los puntos anteriores se deban eliminar conforme a la pequeña estimación de puntos erróneos no detectados y teniendo en cuenta que posteriormente haya más puntos erróneos que también deban eliminarse.

La eliminación no es borrar el punto tal cual, sino cambiarlo más adelante por otro perteneciente a la curva de Bézier proyectada.

- 2) Calcular el punto auxiliar para trazar la curva de Bézier, cogiendo nubes de puntos con una cantidad suficiente que represente el tramo de carretera del que viene dirigido previamente y a la que se va a dirigir posteriormente.

Las nubes de puntos serán distintas. La cantidad de puntos anteriores escogida debe de ser menor a la cantidad de puntos escogida posteriormente. Asimismo las cantidades de puntos escogidas, como deben de ser representativas, cambiarán en función del entorno de la calzada.

Las nubes de puntos escogidas son utilizadas para calcular dos rectas: una con los puntos anteriores al punto erróneo, y otras posteriores al punto erróneo, de modo que el corte de las dos rectas sean el punto auxiliar buscado.

- 3) Obtenido el punto auxiliar, se realiza la curva de Bézier, la cual empieza en el primero de los puntos que no se vayan a cambiar anteriores al erróneo, y terminará justo en el siguiente a los puntos posteriores al erróneo que se vayan también a corregir, de modo que el polígono de control se establece mediante los puntos inicial, auxiliar y final respectivamente.

- 5) **Cambio de los puntos erróneos por las nuevas coordenadas:** considerándose que dentro de la curva de Bézier se encuentran los puntos correctamente, los puntos considerados erróneos se deben de cambiar por las nuevas coordenadas marcadas por la curva.
- 6) **Guardado de la trayectoria corregida:** la trayectoria corregida con los nuevos puntos se guarda en un nuevo fichero para ser utilizado posteriormente.

Capítulo 5. Desarrollo y resultados experimentales del modelo para la mejora de trayectorias GNSS.

A la hora de aplicar el algoritmo explicado en el apartado 4, los resultados experimentales obtenidos del modelo hacen ver que los puntos clave a la hora de aplicar debidamente las curvas son la detección de los puntos erróneos, y la realización de las rectas para calcular el punto auxiliar de la curva de Bézier.

En este apartado se evaluarán distintos casos para la detección de puntos erróneos como para la obtención de las rectas para calcular el punto auxiliar. Previamente se explican los distintos datos obtenidos en el navegador.

Nos centraremos en la detección de puntos y en la obtención del punto auxiliar (pasos 3 y 4 del algoritmo). La toma de datos (1), la eliminación de puntos repetidos (2), el cambio de los puntos erróneos (5) y el guardado de la trayectoria con los puntos corregidos nuevos (6) se realizan de la mismo modo siempre, excepto en el paso 5 que depende de la cantidad de puntos a corregir.

5.1. Observaciones de los datos facilitados por el navegador GNSS.

El navegador con el que se han realizado las mediciones de posición de la trayectoria almacena una serie de datos que luego pueden cargarse al ordenador mediante un fichero de texto. Los datos que almacenan pueden variar dependiendo del tipo de receptor y de las marcas.

```
6808: 27.10.2014.17.49.16.900
#BESTUTMA,COM1,0,60.5,FINESTEERING,1816,146854.400,00000000,eb16,6988;SOL_COMPUTED,PSRDIFF,30,T,4464043.4968,438101.0473,625.6150,52.1000,WGS84,
1.0320,0.8858,1.5445,"0",64.400,0.000,19,12,0,0,0,0,0,01*67a253bd
6809: 27.10.2014.17.49.16.948
#BESTVELA,COM1,0,60.5,FINESTEERING,1816,146854.600,00000000,827b,6988;SOL_COMPUTED,PSRDIFF,0.150,64.600,20.0869,33.712203,-0.1652,0.0*798fb594
6810: 27.10.2014.17.49.17.91
#BESTUTMA,COM1,0,60.5,FINESTEERING,1816,146854.600,00000000,eb16,6988;SOL_COMPUTED,PSRDIFF,30,T,4464046.7463,438103.3104,625.3517,52.1000,WGS84,
1.0277,0.8846,1.5349,"0",64.600,0.000,19,12,0,0,0,0,0,01*2557286d
6811: 27.10.2014.17.49.17.138
#BESTVELA,COM1,0,56.0,FINESTEERING,1816,146854.800,00000000,827b,6988;SOL_COMPUTED,PSRDIFF,0.150,64.800,20.0679,33.661145,-0.2008,0.0*6a415750
6812: 27.10.2014.17.49.17.281
#BESTUTMA,COM1,0,56.0,FINESTEERING,1816,146854.800,00000000,eb16,6988;SOL_COMPUTED,PSRDIFF,30,T,4464050.0045,438105.5919,625.2351,52.1000,WGS84,
1.0279,0.8837,1.5390,"0",64.800,0.000,19,12,0,0,0,0,0,01*70649ed5
6813: 27.10.2014.17.49.17.344
#BESTVELA,COM1,0,56.0,FINESTEERING,1816,146855.000,00000000,827b,6988;SOL_COMPUTED,PSRDIFF,0.150,65.000,20.1701,33.687310,-0.1897,0.0*d8cf3f46
6814: 27.10.2014.17.49.17.502
#BESTUTMA,COM1,0,56.0,FINESTEERING,1816,146855.000,00000000,eb16,6988;SOL_COMPUTED,PSRDIFF,30,T,4464053.3604,438107.8293,625.2940,52.1000,WGS84,
1.0231,0.8791,1.5260,"0",65.000,0.000,20,13,0,0,0,0,0,01*9a88c0df
6815: 27.10.2014.17.49.17.550
#BESTVELA,COM1,0,56.0,FINESTEERING,1816,146855.200,00000000,827b,6988;SOL_COMPUTED,PSRDIFF,0.150,65.200,20.2028,33.742765,-0.1933,0.0*2524f99c
```

En nuestro caso, el receptor utilizado nos proporciona información de la posición y de la velocidad a la que se mueve en cada momento (fecha y hora en rojo).

- Los datos “**BESTUTM**” (en verde) son aquellos referidos a las posiciones, los cuales se proporcionan, en coordenadas UTM el cuadrante (30 T) con base cartográfica WGS84, los datos de latitud (northing), longitud (easting) y altura (height – “hgt”). (Ver *Tabla 1*)
- Los datos “**BESTVEL**” (en azul) son los obtenidos en la medida de la velocidad, los cuales se proporcionan en velocidad vertical y horizontal así como el rumbo o dirección a la que se dirige en función del norte (Ver *Tabla 2*).

Como se puede observar en las últimas columnas de la *tabla 1* este navegador utiliza señales obtenidas de los sistemas GNSS actuales en funcionamiento Galileo, BeiDou, GPS y GLONASS respectivamente. Asimismo proporciona información sobre el tipo de medida, errores estimados y otros como el número de satélites utilizados para el cálculo o el propio estado del navegador.

Para más información sobre estas señales se recomienda consultar la página de NovAtel (<https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Logs/BESTPOS.htm>), de la cual se han obtenido las *tablas 1 y 2* de características. Cada término entre comas corresponde a cada campo.

Field	Field type	Description	Format	Binary Bytes	Binary Offset
1	BESTUTM header	Log header. See <u>Messages</u> for more information.		H	0
2	sol status	Solution status, see <u>Table: Solution Status</u>	Enum	4	H
3	pos type	Position type, see <u>Table: Position or Velocity Type</u>	Enum	4	H+4
4	z#	Longitudinal zone number	Ulong	4	H+8
5	zletter	Latitudinal zone letter	Ulong	4	H+12
6	northing	Northing (m) where the origin is defined as the equator in the northern hemisphere and as a point 10000000 metres south of the equator in the southern hemisphere (that is, a ‘false northing’ of 10000000 m)	Double	8	H+16
7	easting	Easting (m) where the origin is 500000 m west of the central meridian of each	Double	8	H+24

Field	Field type	Description	Format	Binary Bytes	Binary Offset
		longitudinal zone (that is, a ‘false easting’ of 500000 m)			
8	hgt	Height above mean sea level (m)	Double	8	H+32
9	undulation	Undulation - the relationship between the geoid and the ellipsoid (m) of the chosen datum When using a datum other than WGS84, the undulation value also includes the vertical shift due to differences between the datum in use and WGS84.	Float	4	H+40
10	datum id#	Datum ID number (see Table: Datum Transformation Parameters)	Enum	4	H+44
11	N σ	Northing standard deviation (m)	Float	4	H+48
12	E σ	Easting standard deviation (m)	Float	4	H+52
13	hgt σ	Height standard deviation (m)	Float	4	H+56
14	stn id	Base station ID	Char[4]	4	H+60
15	diff_age	Differential age in seconds	Float	4	H+64
16	sol_age	Solution age in seconds	Float	4	H+68
17	#SVs	Number of satellites tracked	Uchar	1	H+72
18	#solnSVs	Number of satellite vehicles used in solution	Uchar	1	H+73
19	#ggL1	Number of GPS plus GLONASS plus BDS L1/B1 used in solution	Uchar	1	H+74
20	#solnMultiSV	Number of satellites with L1/E1/B1 signals used in solution	Uchar	1	H+75
21	Reserved		Uchar	1	H+76
22	ext sol stat	Extended solution status (see Table: Extended Solution Status)	Hex	1	H+77
23	Galileo and BeiDou sig mask	Galileo and BeiDou signals used mask (see Table: Galileo and BeiDou Signal-Used Mask)	Hex	1	H+78
24	GPS and GLONASS sig mask	GPS and GLONASS signals used mask (see Table: GPS and GLONASS Signal-Used Mask)	Hex	1	H+79
25	xxxx	32-bit CRC (ASCII and Binary only)	Hex	4	H+80

Tabla 1: Datos ofrecidos por el navegador NovAtel sobre la medida de la posición en coordenadas UTM. Fuente: <https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Logs/BESTUTM.htm>

Field	Field type	Description	Format	Binary Bytes	Binary Offset
1	BESTVEL header	Log header. See <u>Messages</u> for more information.		H	0
2	sol status	Solution status, see <u>Table: Solution Status</u>	Enum	4	H
3	vel type	Velocity type, see <u>Table: Position or Velocity Type</u>	Enum	4	H+4
4	latency	A measure of the latency in the velocity time tag in seconds. It should be subtracted from the time to give improved results (s)	Float	4	H+8
5	age	Differential age in seconds	Float	4	H+12
6	hor spd	Horizontal speed over ground, in metres per second	Double	8	H+16
7	trk gnd	Actual direction of motion over ground (track over ground) with respect to True North, in degrees	Double	8	H+24
8	vert spd	Vertical speed, in metres per second, where positive values indicate increasing altitude (up) and negative values indicate decreasing altitude (down)	Double	8	H+32
9	Reserved		Float	4	H+40
10	xxxx	32-bit CRC (ASCII and Binary only)	Hex	4	H+44
11	[CR][LF]	Sentence terminator (ASCII only)	-	-	

Tabla 2: Datos ofrecidos por el navegador NovAtel sobre la medida de la velocidad. Fuente: <https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Logs/BESTVEL.htm>

Al encontrarnos en la práctica en un solo cuadrante UTM podemos prescindir de este dato. España se divide varios cuadrantes, de modo que si tuviésemos que evaluar una trayectoria entre cuadrantes podríamos prescindir también de este dato debido a que este navegador utiliza como base cartográfica el WGS84, que como se cuenta en el 2.2.4.2, es la base cartográfica mundial que en su última actualización tiene errores de centímetros. Al mismo tiempo los datos de coordenadas UTM se proporcionan en metros, siendo una ventaja a la hora de hacer operaciones para calcular distancias.

Por tanto los datos que se utilizan para aplicar el algoritmo mediante distintos métodos para detectar los errores de la trayectoria son:

- **BESTUTM:** los campos de latitud o coordenada Y (6), longitud o coordenada X (7), y sus estimaciones de desviación respectivamente (campos 11 y 12). El dato de la desviación típica nos ayudará a estimar si una posición es errónea o no.

- **BESTVEL:** los datos de rumbo o dirección respecto al norte (7)

5.2. Observación de la trayectoria inicial

Utilizando los datos de los campos 6 y 7 de los datos de posición recogidos del navegador pro satélite, obtenemos la trayectoria inicial tal y como se observa en la siguiente imagen

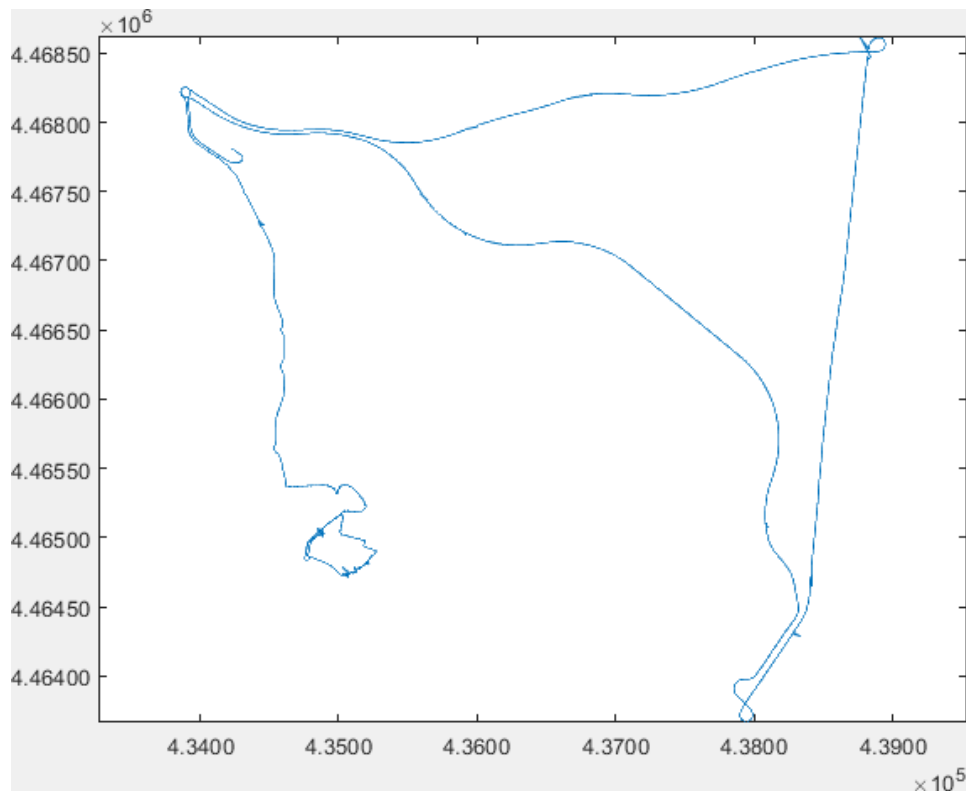


Ilustración 26: Imagen general de la trayectoria registrada

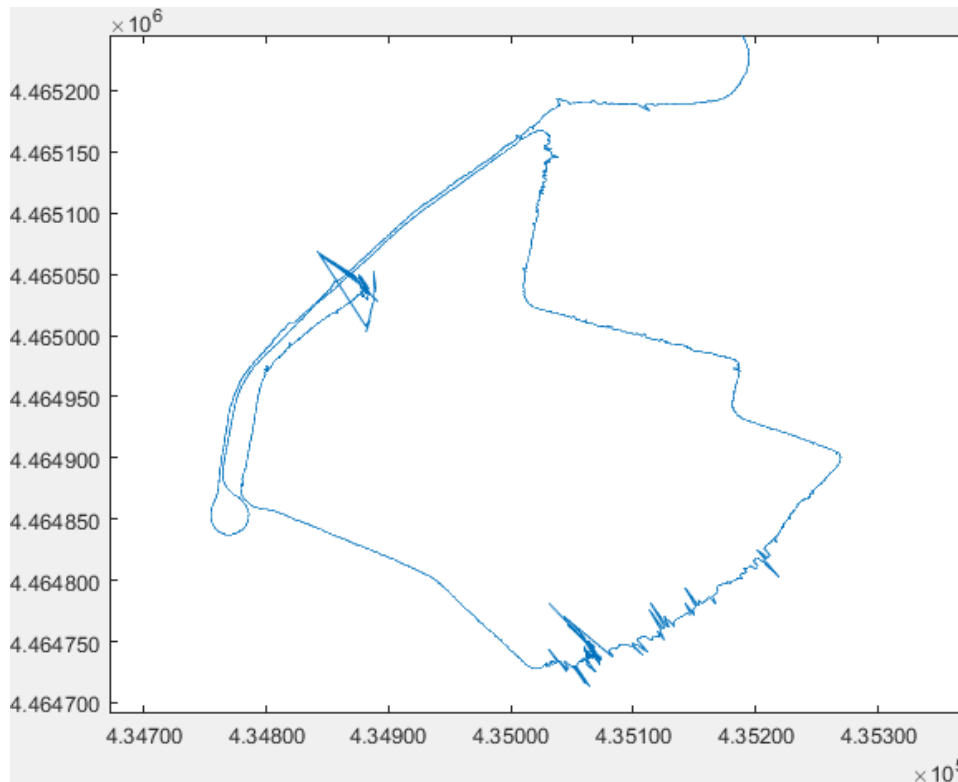


Ilustración 27: Imagen de detalle de zona céntrica

A grandes rasgos podemos comprobar los dos entornos en los que se puede mover un vehículo: los entornos urbanos y los entornos interurbanos. Asimismo podemos dividir también los tramos de forma más precisa con lo que nos vamos a encontrar:

- Vías rápidas: engloban a las vías interurbanas (autovías, autopistas y carreteras convencionales) y avenidas y calles principales. Aquí podemos observar que los errores aparecen de forma más puntual y no tanto de forma sucesiva, lo que nos permite que sean más fáciles a la hora de corregir y aplicar las curvas.
- Vías céntricas: sobretodo las zonas de alta densidad de edificios, con calles estrechas y edificios de cierta altura cercanos los unos con los otros. En estas zonas de observan una cantidad de errores sucesivos, de modo que a la hora de corregir y aplicar las curvas de Bézier vamos a tener más problemas.

En los apartados siguientes se van a explicar las diferencias a la hora de aplicar los métodos en estos dos tipos de tramos.

5.3. Método de las pendientes

En este método se pretende detectar los puntos erróneos de la trayectoria comparando una pendiente con su anterior, de modo que si hay un cambio repentino de la pendiente.

Los puntos que nos marcan la trayectoria, eliminados previamente los coincidentes que no nos aportan información alguna, se utilizan para calcular las pendientes:

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}$$

La diferencia de pendientes será en base al punto anteriormente conocido, de modo que:

$$\Delta m = m_{i+1} - m_i$$

Ampliando enormemente las trayectorias se puede observar que si el vehículo se encuentra con buena cobertura las pendientes no cambian de forma brusca si están correctamente localizadas. Estos cambios de pendientes son independientes de la velocidad a la que vaya el vehículo debido a que, considerando que la velocidad de toma de datos es constante, ésta se adecúa al trazado y vamos a encontrar aproximadamente los mismos puntos en una curva larga y rápida como puede ser la de una autovía, como en una curva corta y a velocidad baja como en un giro de calle.

Según esto, esta diferencia de pendientes debe de ser lo suficientemente pequeña para que se detecten errores en los cambios de trayectoria erróneos, pero lo suficientemente grande como para que no se detecten los giros que son correctos, de modo que para asegurarnos qué error como máximo admitir, debemos fijarnos en lugares donde se realizan curvas fuertes, como en el caso de las rotondas o en curvas cerradas, por lo que tomamos un tramo de prueba que esté correcto y lo utilizamos para observar que lo máximo admisible, por seguridad, es un error de 0.7

En la práctica se pudo ver también que había un problema con éste método. Con los cambios de pendiente positiva a pendiente negativa, y viceversa, las pendientes en vez de restarse podían sumarse, generando problemas de detección. Al mismo tiempo, si se elevaba el error hasta un valor por encima de la unidad, algunos puntos erróneos no se detectaban:

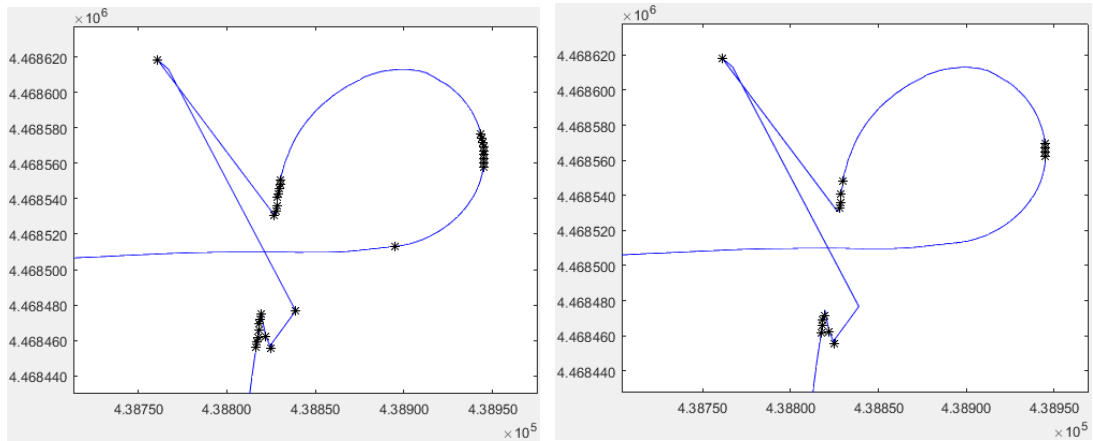
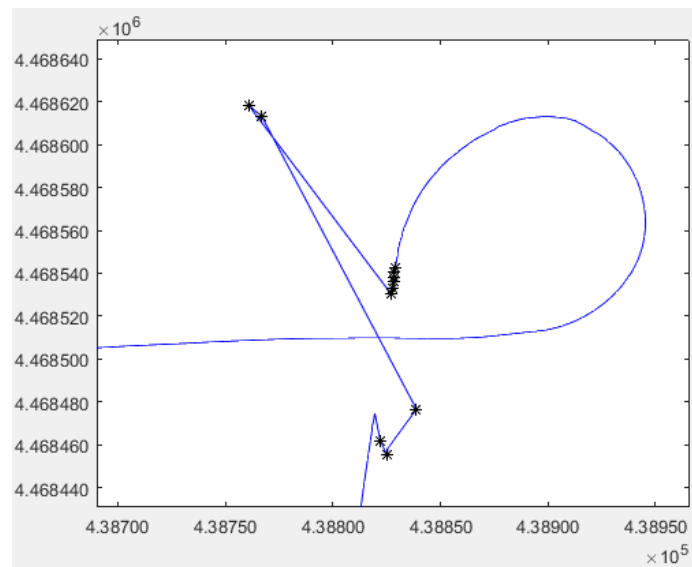
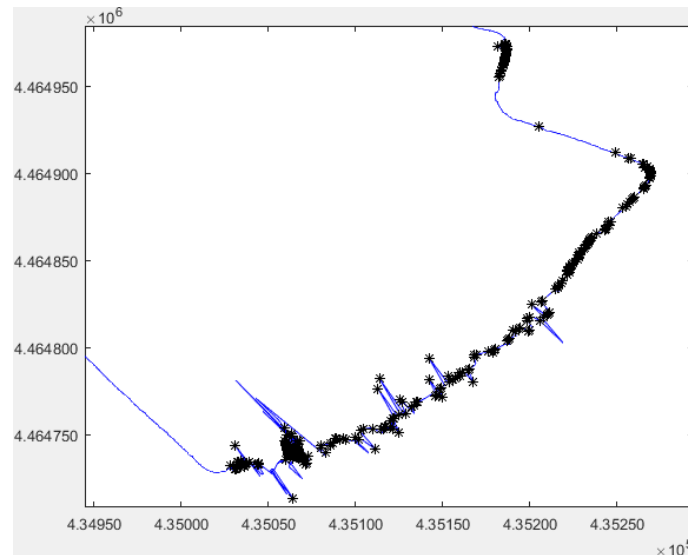


Ilustración 28: Imágenes para $\text{error} > 0.7$ y para $\text{error} > 3$. Nótese que el efecto del cambio de pendiente disminuye, pero empiezan a no detectarse puntos erróneos

La solución para éste problema es ayudarnos del dato ofrecido por el navegador de desviación típica (campo 6 de la *Tabla 1 – BESTUTM*), la cual podemos considerar como el error de medida estimado por el navegador a la hora de calcular la posición. Gracias a este dato podemos no considerar como posiciones erróneas a puntos que antes se consideraban mal posicionados de forma equivocada.



Aun así no siempre ayuda el dato de la estimación. Hay veces que los errores son claros y los puntos no son detectados, como en el caso de los trayectos urbanos



Sin embargo este método puede resultar muy útil, por lo que el algoritmo a seguir para detectar los puntos mediante la diferencia de pendientes queda:

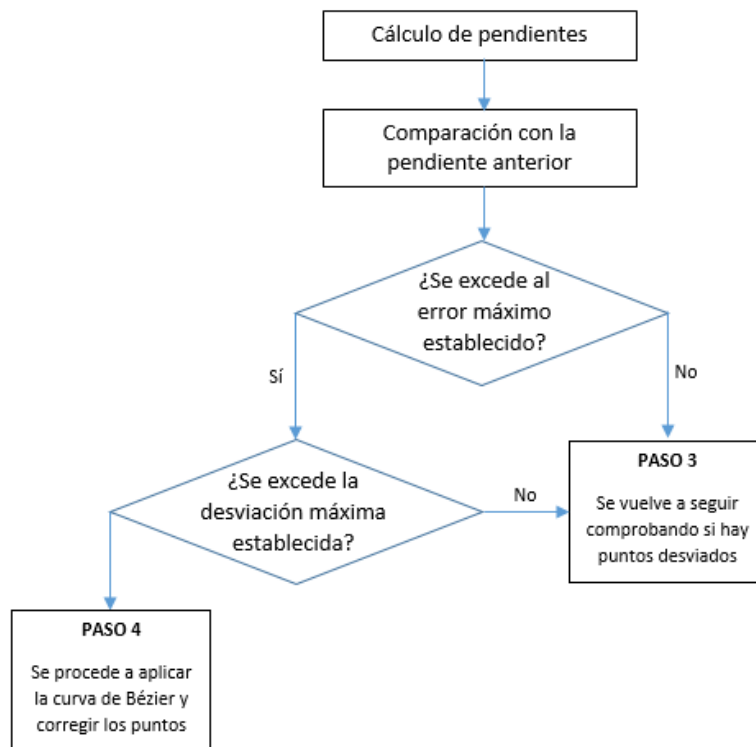


Ilustración 29: Diagrama de funcionamiento de detección mediante diferencia de pendientes

5.4. Método de diferencia de ángulos

En este método se pretende detectar los puntos erróneos en base a un cambio brusco del ángulo de dirección de un segmento de la trayectoria con respecto a su anterior.

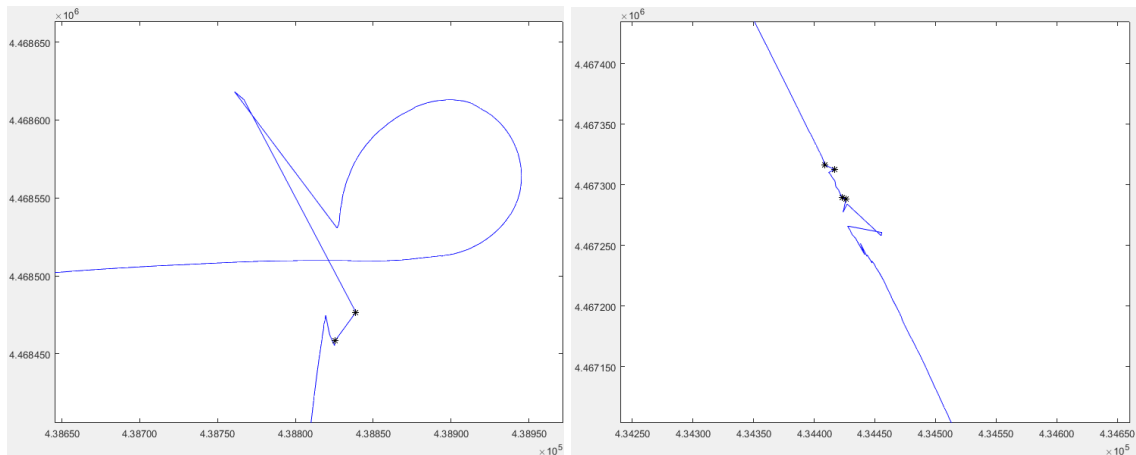
5.4.1. Mediante el dato de rumbo proporcionado por el navegador

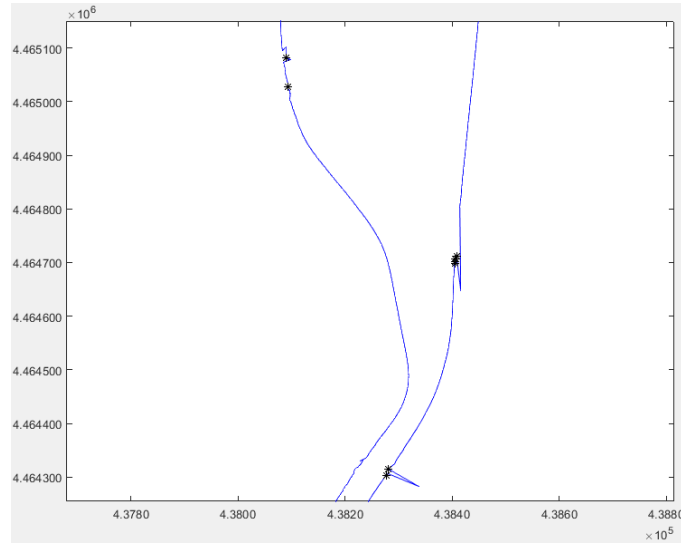
El dato de los grados son obtenidos mediante el dato de rumbo proporcionado en los datos de velocidad (ver *tabla 2* – datos *BESTVEL*) por el campo 7 (*track over ground*). Este dato se corresponde con el ángulo en el que se mueve el vehículo en ese preciso instante con respecto al norte geográfico.

El rumbo puede ser medido dependiendo del tipo de navegador GNSS.

- Si el navegador calcula el rumbo mediante la dirección del segmento que une dos posiciones calculadas, podría ser una medida útil para este método de detección de puntos erróneos.
- Por lo contrario, si tenemos un navegador con magnetómetro o sistemas inerciales incluidos que ayudan a calcular el rumbo mediante las medidas de estos sensores, nunca calculara el rumbo mediante segmentos cuando se pierda la señal, de modo que no se calculará una diferencia de ángulos fiable.

En nuestro caso, hemos obtenido los siguientes resultados a la hora de detectar los puntos desviados:





Debido a estos resultados con tantas imprecisiones a la hora de detectar los puntos erróneos de la trayectoria, no se siguió adelante el proceso de corrección de trayectorias. Sin embargo, en otros casos en los que el dato del rumbo sea más preciso y basado únicamente en las medidas de posición por señales satélites, la detección de puntos con éste método puede resultar igual de útil que los métodos de diferencia de pendientes o de coordenadas polares.

5.4.2. Mediante coordenadas polares

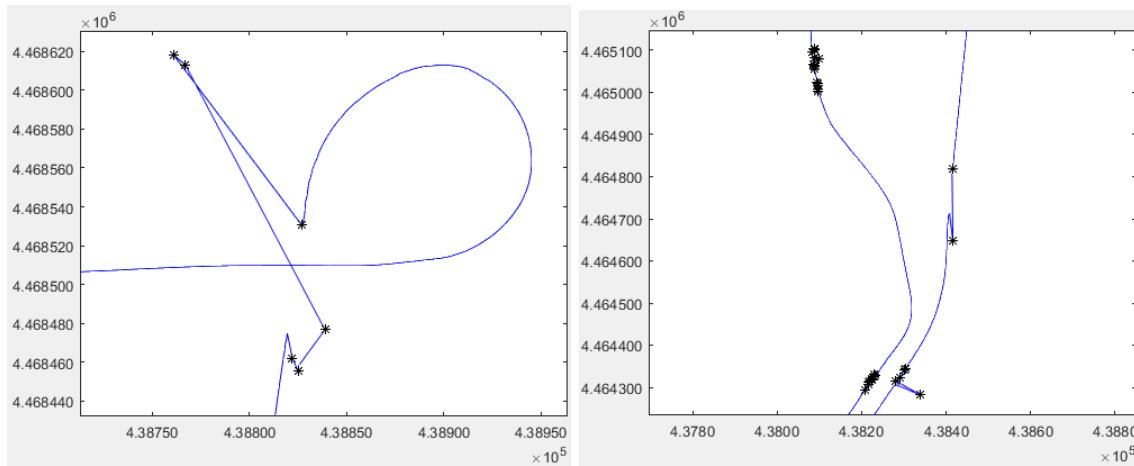
Para comparar los ángulos de los puntos de las trayectorias, previamente debemos convertir los segmentos formados entre dos puntos en módulo y ángulo.

$$modulo(i) = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$$

$$angulo(i) = arctg\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}\right)$$

Cabe decir que el origen de coordenadas de cada segmento se encuentra en su punto inicial, ya que si utilizamos el origen de coordenadas común para todos los puntos de la trayectoria, el cual se encuentra en el corte del ecuador con el meridiano de Greenwich, no se apreciaría prácticamente las diferencias entre ángulos.

En la detección de puntos desviados este método no presenta el problema que tenía el método de las pendientes en los cambios de pendientes, de modo que en la detección de puntos se producen bastantes menos falsos positivos. Debido a esto también se puede utilizar el dato de desviación típica (*Tabla 1: datos BESTUTM de las posiciones, campo*) para comparar posibles falsos positivos, bajando el máximo de 2.8 metros utilizado por pendientes a hasta 2 metros utilizado en éste.



Con las observaciones realizadas podemos establecer que el método a seguir es muy parecido al método mediante diferencia de pendientes a nivel de algoritmo:

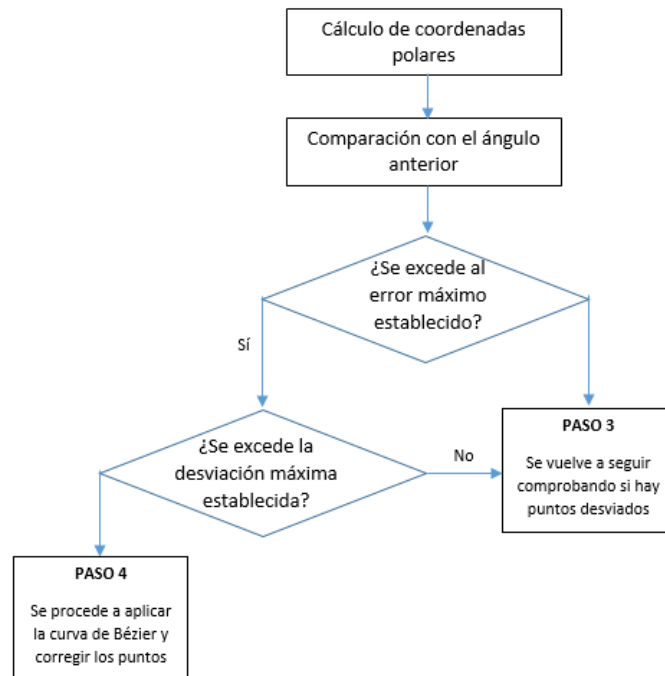


Ilustración 30: Diagrama de funcionamiento de detección mediante diferencia de ángulos con coordenadas polares

5.5. Explicación las coordenadas a corregir.

Suponiendo que los puntos anteriores, ya revisados, son correctos, detectamos un punto erróneo por tener una alta desviación de la pendiente o del ángulo con respecto a la anterior y que se corrobora con su dato de desviación. Se observa que:

- En los puntos anteriores puede haber pequeñas desviaciones de la trayectoria no detectadas previamente. Asimismo si se utilizan estos puntos desviados se pueden producir imprecisiones a la hora de estimar la recta de la dirección en la que se viene.
- En los puntos posteriores seguramente se produzcan, en mayor o menor medida según el entorno, desviaciones de la trayectoria.

De base para aplicar la curva de Bézier, los pasos que se han seguido para corregir las trayectorias son los siguientes:

- Eliminaremos al menos los dos puntos anteriores, por seguridad de que sean incorrectos y no se hayan detectado.
- Hay veces que entre los puntos correctos y los incorrectos puede haber una cantidad de puntos incorrectos. En la observación se ha estimado un mínimo de hasta 8 puntos hasta que la trayectoria vuelva a sus posiciones verdaderas, por lo que estos puntos serán cambiados por otros nuevos que forman la curva de Bézier.

En total, se corregirán un total de al menos 11 puntos: 1 propiamente detectado incorrecto, y 2 anteriores y 8 posteriores que se estiman que pueden estar incorrectos.

El paso siguiente es establecer el número de puntos que se utilizarán para estimar las dos rectas cuyo punto de corte indican el punto auxiliar buscado para la aplicación de la curva:

- Puntos anteriores: suponiendo que partimos de puntos correctos, cogeremos pocos puntos para que sean representativa la dirección en la que se mueve el vehículo. Si cogemos muchos es posible que a lo mejor se produzcan errores a la hora de estimar la recta que nos marca la dirección de la que se viene. Por ejemplo, si hay un punto mal situado a la salida de una rotonda o calle, si cogemos muchos puntos nos puede cambiar la pendiente de la recta y no parecerse en nada a la dirección real.
- Puntos posteriores: en general se deben de coger bastantes más puntos que en la nube de puntos anterior al detectado incorrecto:
 - Si se estima que hay muchos errores de posición a posteriori, se deben de coger muchos puntos para estimar lo mejor posible la dirección a la que se debe dirigir.

- Si se estima que hay pocos errores a posteriori, tampoco se deben de coger demasiados para no producir errores en la estimación de la recta, la cual indica la dirección en la que se va a mover más adelante.

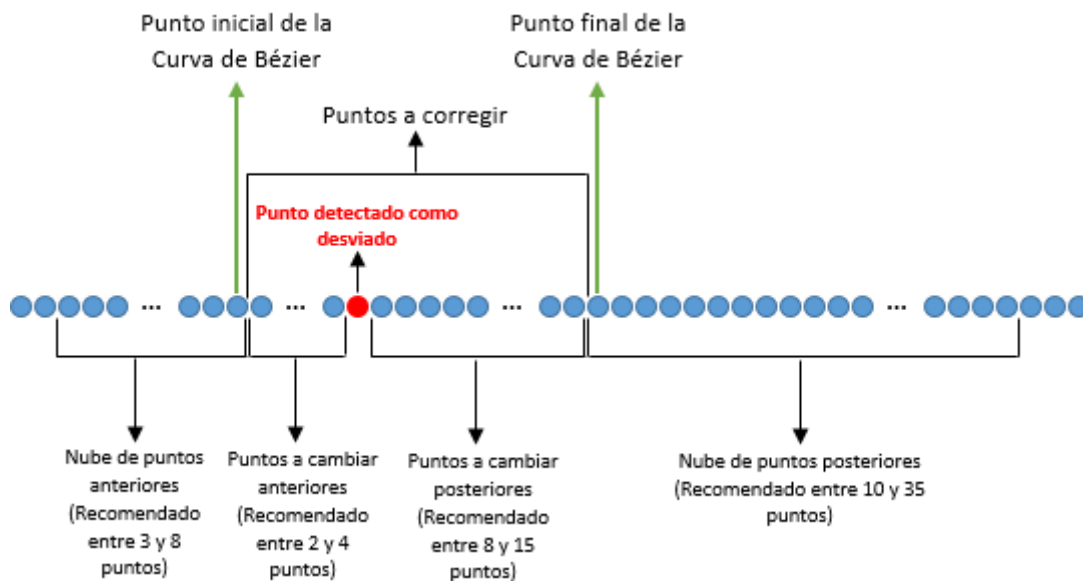


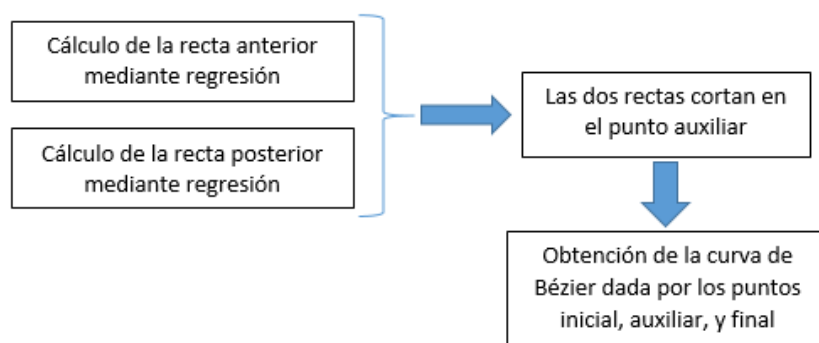
Ilustración 31: Diagrama esquemático de los distintos puntos a utilizar para la aplicación de las curvas de Bézier

Dicho lo anterior, el objetivo que se persigue a la hora de estimar las rectas que nos ayudan a calcular el punto auxiliar de la curva de Bézier estimada, es que las rectas se aproximen lo máximo posible a la carretera o dirección por las que se va a mover el vehículo. Las diferencias de coger más o menos puntos se hacen notables sobretodo en entornos urbanos, donde los cambios de dirección a la hora de girar distintas calles son más numerosos, mientras que los cambios en autopistas son menos bruscos. Además a esto se le suma que en entornos urbanos el número de errores de posición en la trayectoria son más numerosos e incluso constantes que en vías interurbanas.

A la hora de calcular las rectas se utiliza el método de los mínimos cuadrados. Este método es bastante sencillo a la hora de calcular la recta pendiente que siguen las direcciones de las cuales viene el vehículo y a las que se dirige. Este método utiliza todos los puntos de una población estadística dada, de modo que existen muchos valores atípicos puede cambiarnos de forma equivocada la pendiente de la recta.

Con esto procedemos a aplicar las curvas de Bézier y a corregir las trayectorias, siendo el punto inicial el justamente anterior a los valores que se van a cambiar, el punto final siendo justamente el posterior de los que se van a cambiar, y el punto auxiliar que completa el polígono de control vendrá dado por la intersección de las dos rectas.

Aplicación de la curva de Bézier



El cambio de las coordenadas erróneas por las nuevas que forman la nueva curva, se cambian de forma proporcional al número de correcciones, es decir, si vamos a cambiar 11 puntos cada uno de ellos cambiarán sus coordenadas por puntos equidistantes de la curva de Bézier nueva.

A continuación se ven imágenes de distintos tramos corregidos en zonas interurbanas y urbanas.

5.6. Resultados y análisis

Como se ha comentado varias veces hay diferencias en los parámetros a tener en cuenta para la aplicación de la curva de Bézier. No es lo mismo corregir un error puntual que se pueda dar en una trayectoria de autopista, que por pasar por debajo de un puente se pierda la señal, que corregir un giro en plena zona de casco antiguo donde se generan muchos errores de posición y de forma reiterada.

Al mismo tiempo no es lo mismo tener en cuenta más puntos de la trayectoria en la población estadística a utilizar para conseguir la recta de regresión, que nos aporta la dirección de la que se viene o hay que seguir, si los entornos son muy cambiantes, ya que cogería más información de la que puede ocupar, por ejemplo una calle, y asimismo perder información.

A continuación se verán distintos ejemplos de aplicación, en distintos entornos, de los métodos ya explicados en este capítulo.

5.6.1. Aplicación del algoritmo detectando errores por el método de la diferencia de pendientes

En base al análisis de la trayectoria y en la estimación de que puede haber al menos 2 puntos anteriores no detectados a corregir, y que tras el detectado pueden encontrarse al menos 8 puntos hasta que la trayectoria vuelva a ser correcta. Los puntos cogidos para estimar las rectas de regresión son 3 puntos para la anterior y 15 para la posterior, obteniéndose los siguientes resultados:

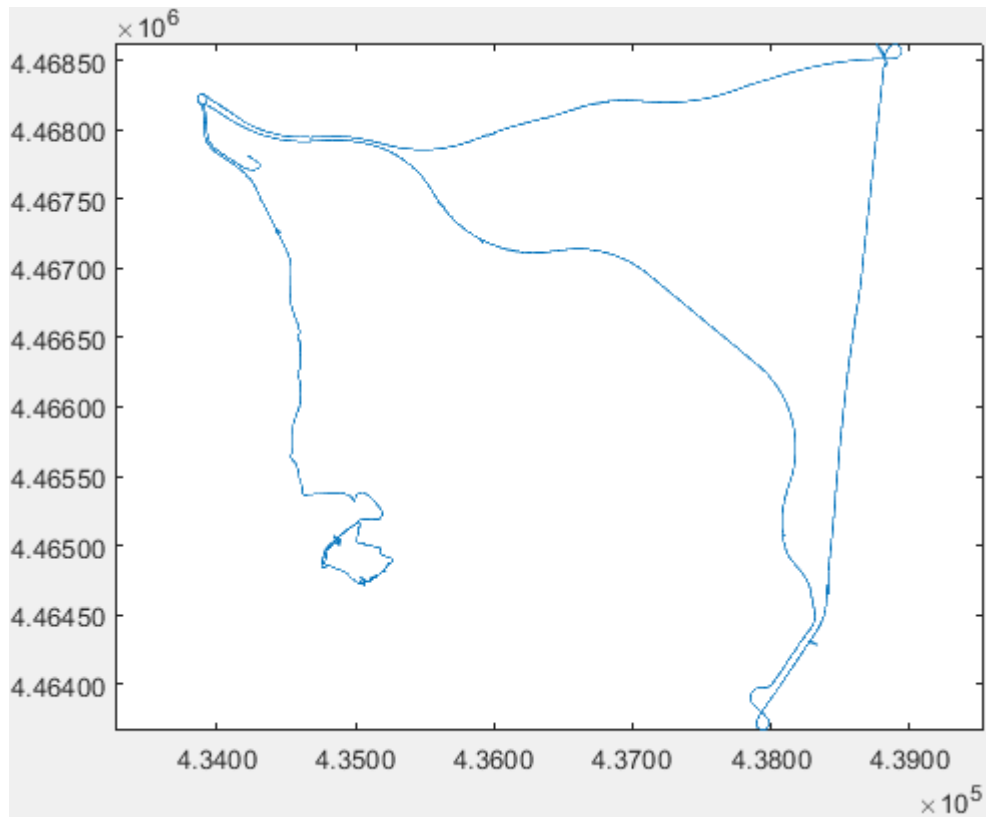


Ilustración 32: Imagen de la trayectoria inicial

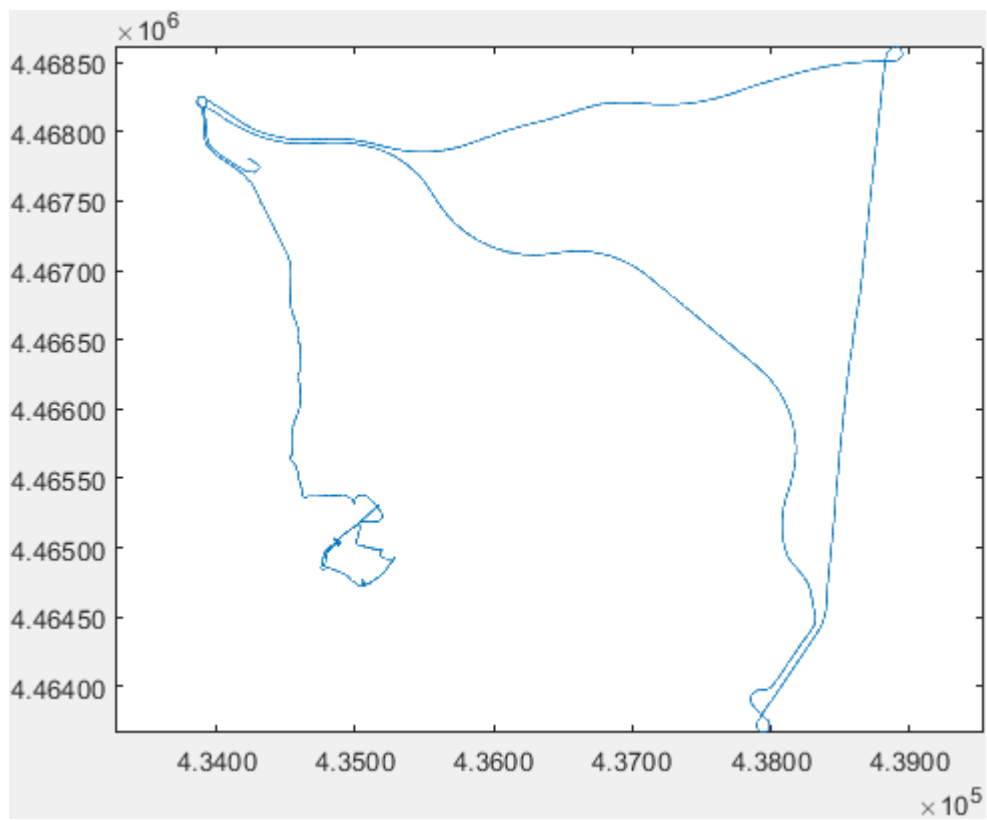
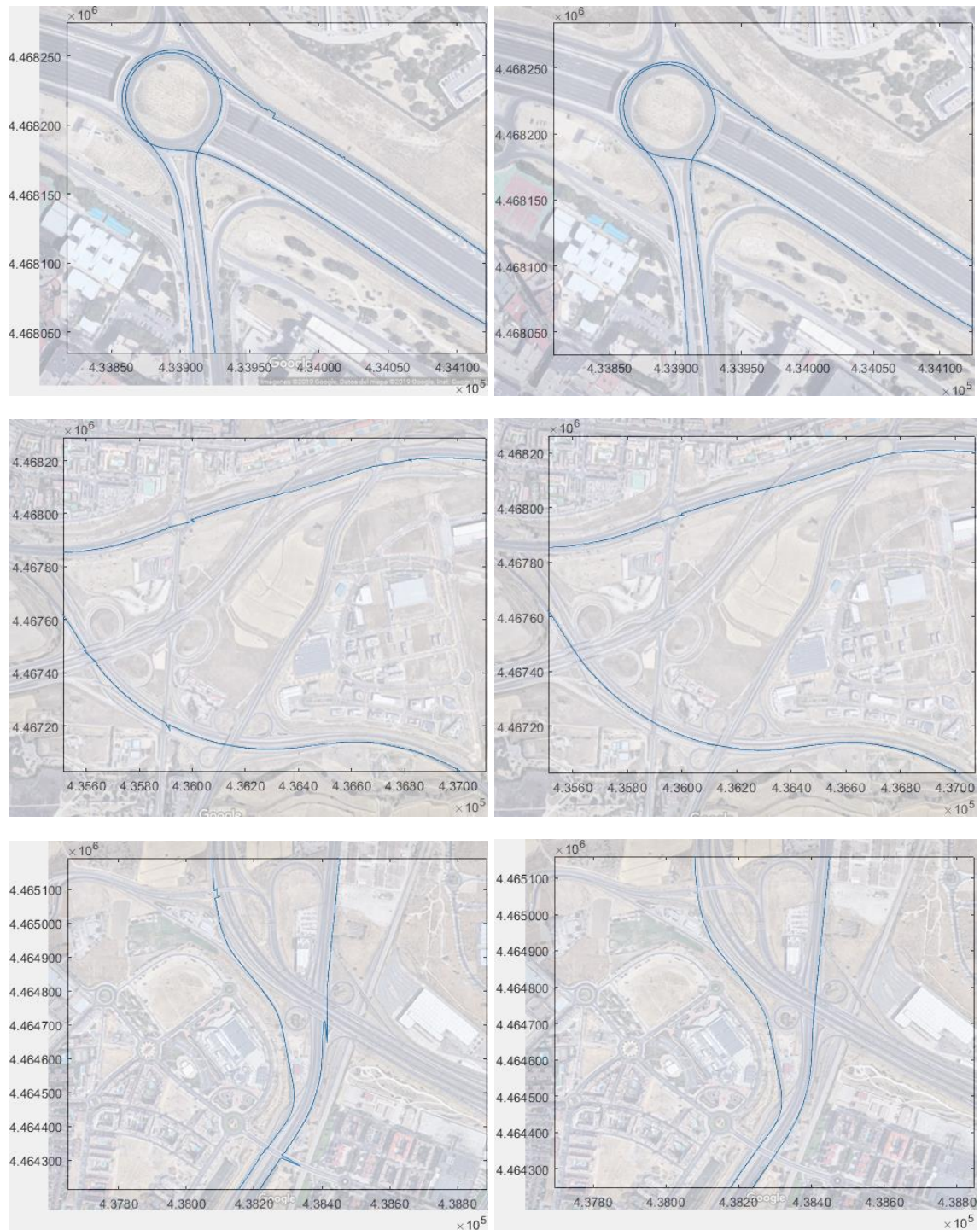
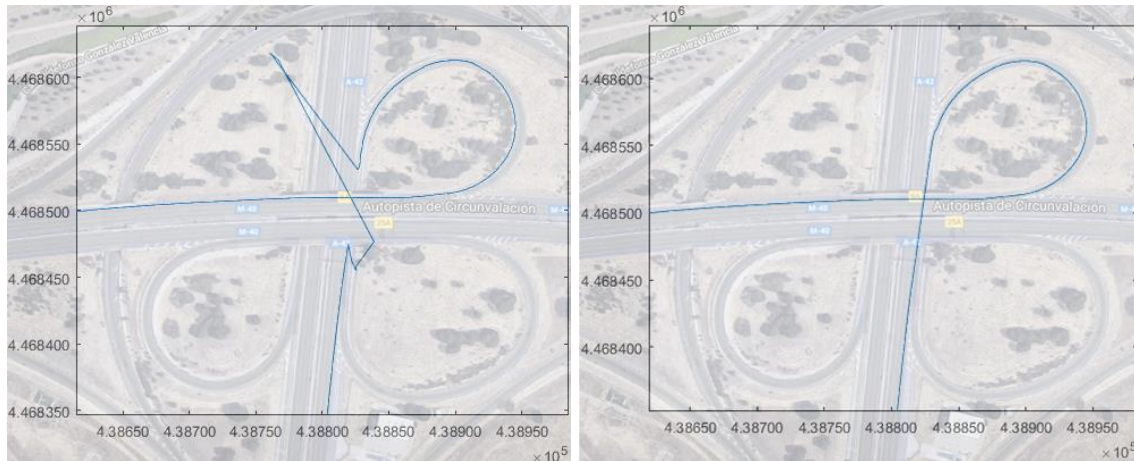


Ilustración 33: Imagen de la trayectoria recogida con error máximo de 0.7 y desviación máxima de 2.8m

5.6.1.1. Vías interurbanas

Se muestran detalles del entorno interurbano:





Como podemos observar en entornos interurbanos la corrección de los errores detectados es bastante aceptable, aunque hay zonas que se mejora el trazado y la corrección con el método de diferencias de ángulos como veremos en el apartado 5.6.2.

5.6.1.2. Vías urbanas

Se muestran los detalles del entorno urbano:

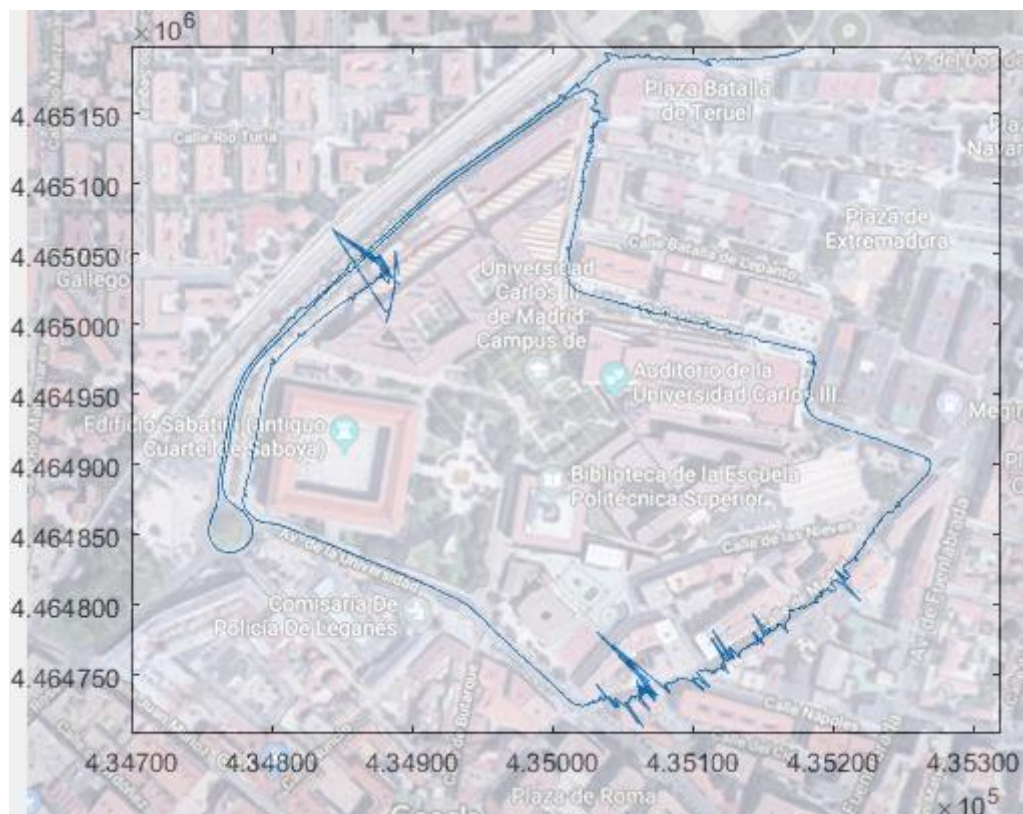


Ilustración 34: Trayectoria inicial de zona urbana

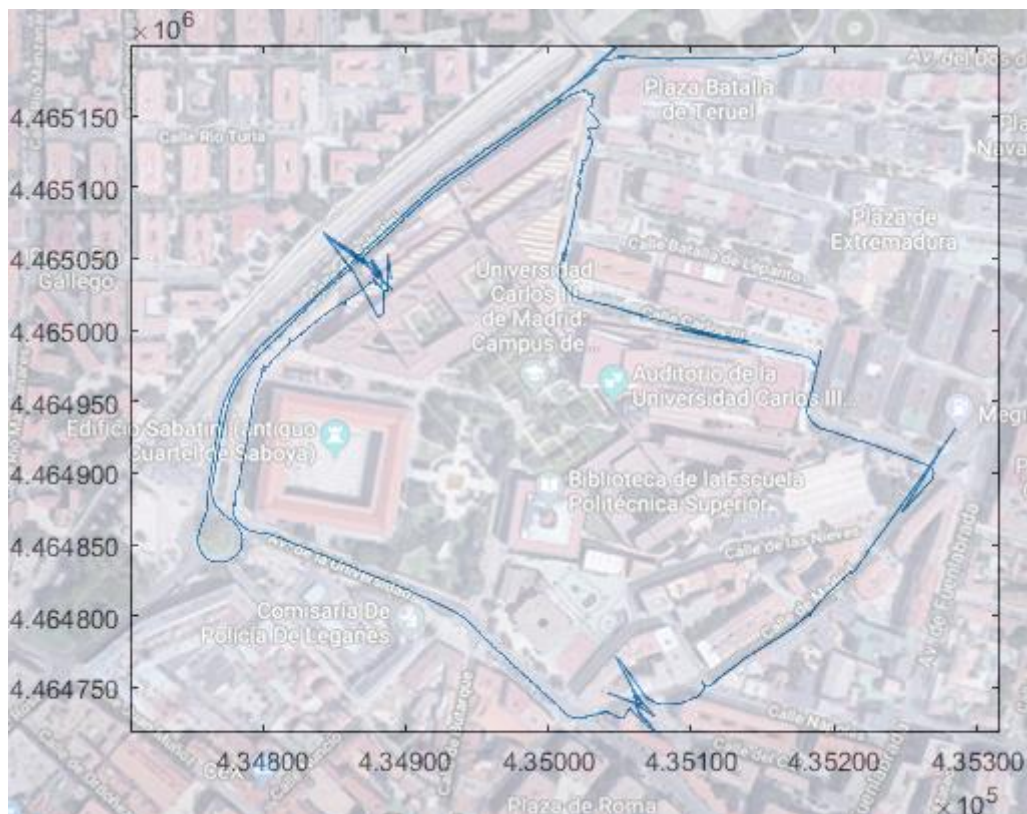


Ilustración 35: Trayectoria final de la zona urbana, resuelto por pendientes

Como detalles de las últimas imágenes:



Ilustración 36: Caso 1: no se llegan a corregir del todo la trayectoria y se realizan sucesivamente varias curvas



Ilustración 37: Caso 2: debido a las insuficientes cantidades de puntos para estimar las rectas, se generan nuevas distorsiones y las curvas no son las deseadas.

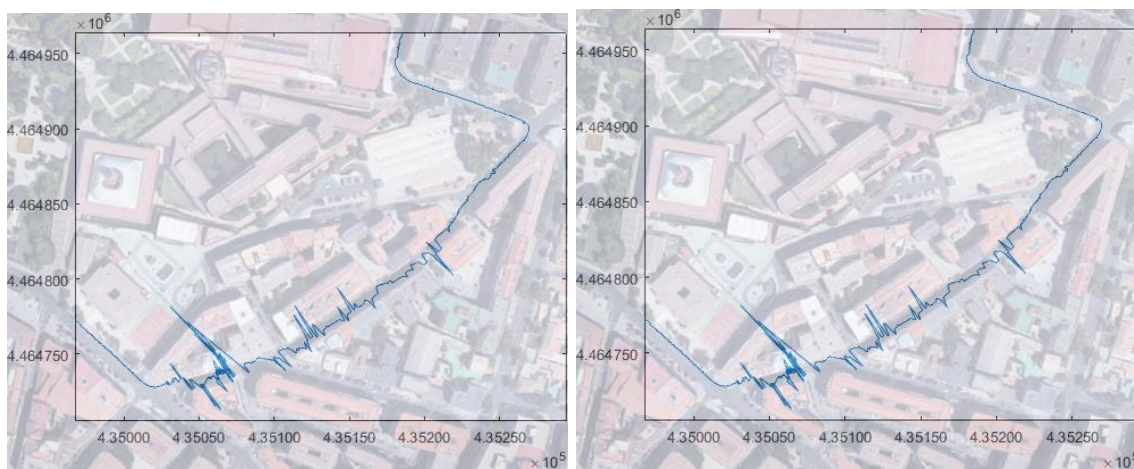


Ilustración 38: Caso 3: La alta distorsión de la trayectoria en algunos tramos provoca que se pierda información, de modo que también se pierde un poco la noción de cómo pueden seguir los caminos.

Como podemos ver en entornos muy urbanos no se corrigen del todo los trazados sino que además aparecen nuevas distorsiones en la trayectoria. Esto puede deberse a varios casos:

- 1) No se han cogido puntos suficientes para rectificar, de modo que sucesivamente se realizan curvas que del mismo modo cogen puntos que tampoco son correctos para estimar el punto auxiliar de la curva.
- 2) Aunque se cojan los puntos suficientes para corregir la curva, si no se cogen cantidades suficientes para la estimación de las rectas coincidentes con las direcciones anterior y posterior, el punto auxiliar no estará bien definido y por tanto la curva de Bézier construida puede tener diferencias con la realidad o incluso no parecerse a ella. De hecho en las imágenes podemos ver que aparecen distorsiones nuevas pero de modo más puntual.
- 3) A veces la distorsión de algunos tramos es tan elevada que los puntos a corregir y los puntos a utilizar para estimar las rectas del punto auxiliar son insuficientes.

Este es el caso más complicado, debido a que si cogemos muchos puntos tanto para corregir como para obtener el punto auxiliar, puede perderse información y que el resultado no se parezca a la realidad.

Para ello se hacen pruebas, para ver si cambiando el número de correcciones y obteniendo el punto auxiliar con distintas cantidades de puntos se obtienen mejores resultados.

5.6.1.3. Corrección de entorno urbano de 17 puntos con nube posterior de 35 puntos:

En fijándonos de nuevo en la zona urbana sí se aprecia alguna mejora en distintas zonas:

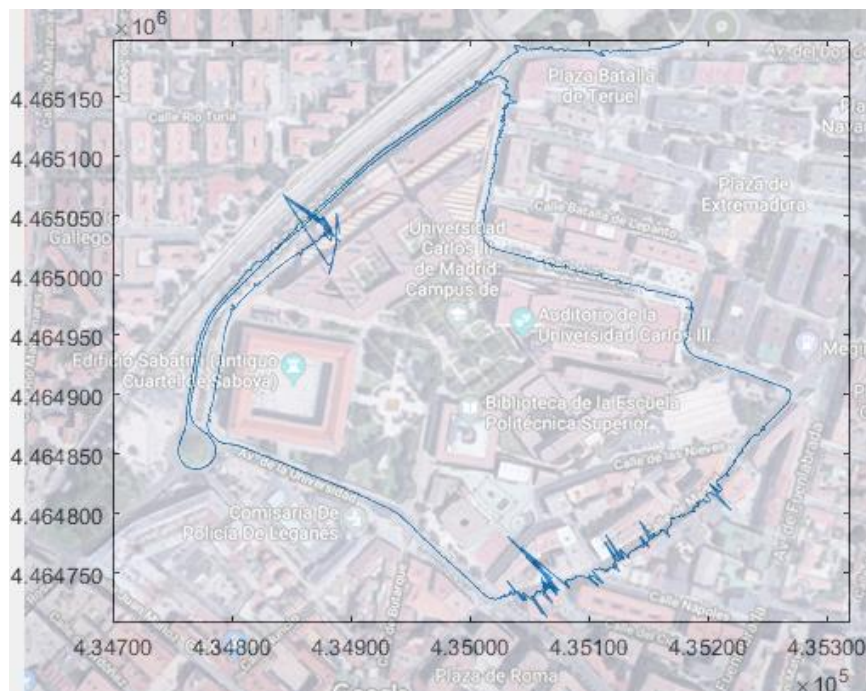


Ilustración 39: Trayectoria inicial



Ilustración 40: Trayectoria final, por pendientes con 17 puntos corregidos y 35 de nube posterior

Como podemos observar, hay tramos en los que se mejoran las curvas y las trayectorias, sin embargo hay otros en los que la alta cantidad de puntos a “corregir” y que se utilizan para estimar las rectas, que las curvas de Bézier creadas no son las esperadas, incluso llegando a deformar alguna calle, como se ve en los siguientes detalles:

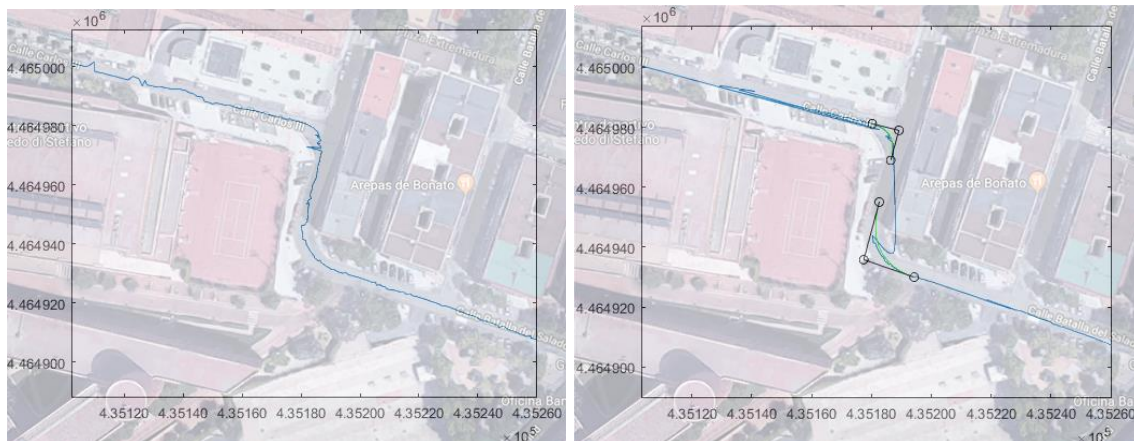
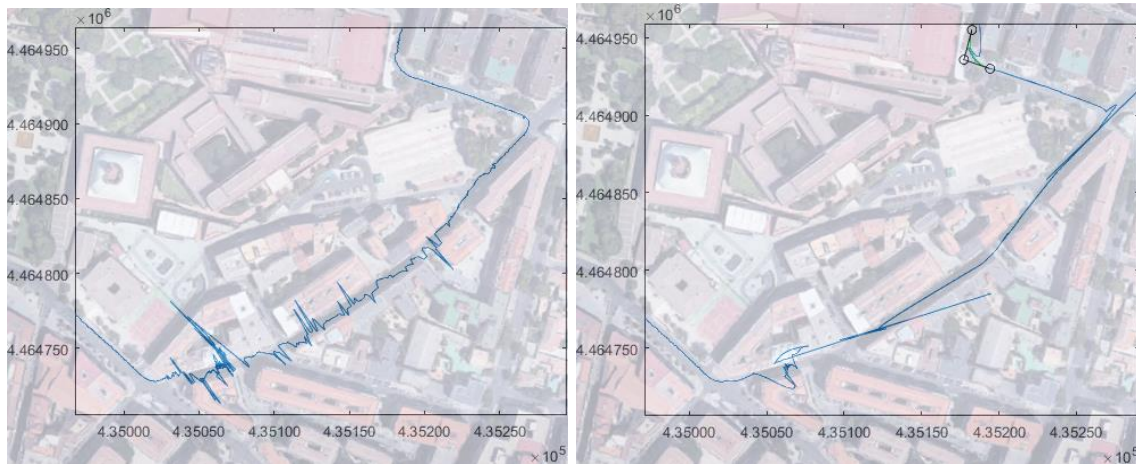


Ilustración 41: En verde se dibuja la trayectoria que teóricamente debe aparecer. Como se puede apreciar, al haber cogido muchos puntos para estimar la recta de regresión, ha provocado que se tengan en cuenta para ella puntos que están al otro lado del giro de la calle, y por tanto la recta calculada no se encuentra en la dirección apropiada.



***Ilustración 42:** Como se puede observar, al cambiar más puntos permite que se eliminen muchos puntos erróneos, y el coger una mayor cantidad de puntos a estimar nos ayuda a que la recta calculada siga la dirección de la calle a la que se debe seguir. A pesar de ello en las zonas donde hay mucha distorsión se sigue apreciando una “pérdida de información” a la hora de aplicar la curva de Bézier.*

5.6.2. Aplicación del algoritmo detectando errores por el método de la diferencia de ángulos

Igualmente que en el apartado anterior, los siguientes resultados se han resuelto también con lo explicado en punto 5.5: corregimos el punto detectado como erróneo, 2 anteriores a él y 8 posteriores a él, siendo 3 puntos los que forman la nube de puntos para estimar la recta anterior, y de 15 puntos para estimar la recta posterior:

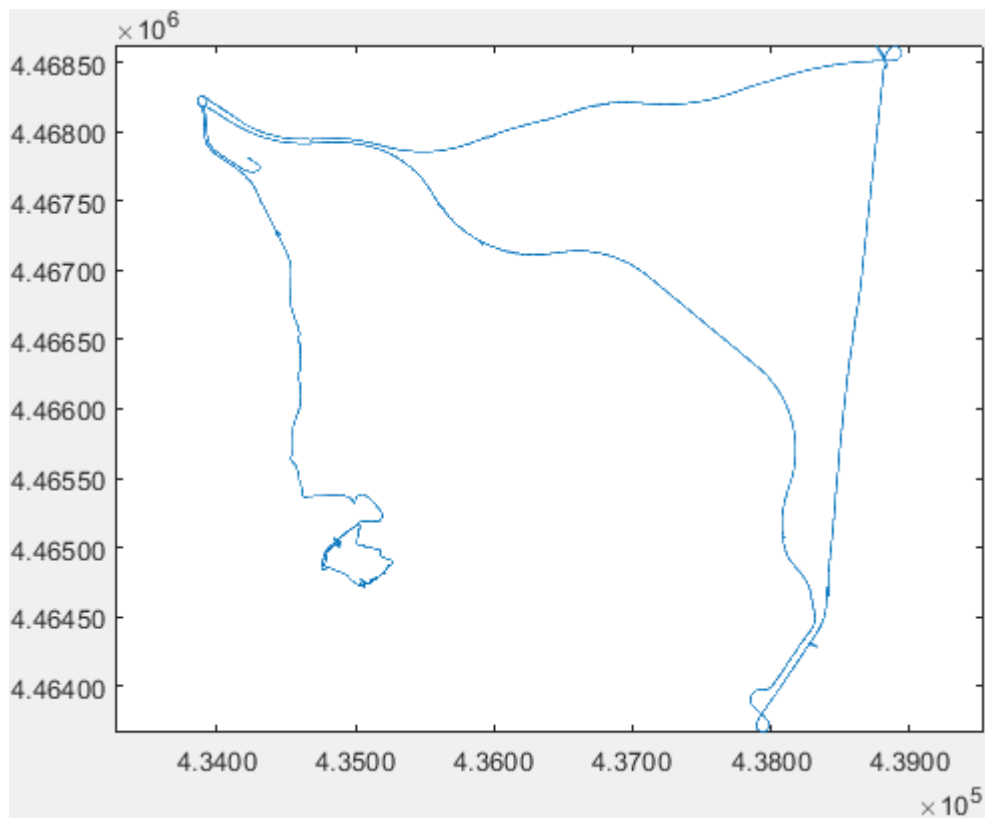


Ilustración 43: Imagen inicial

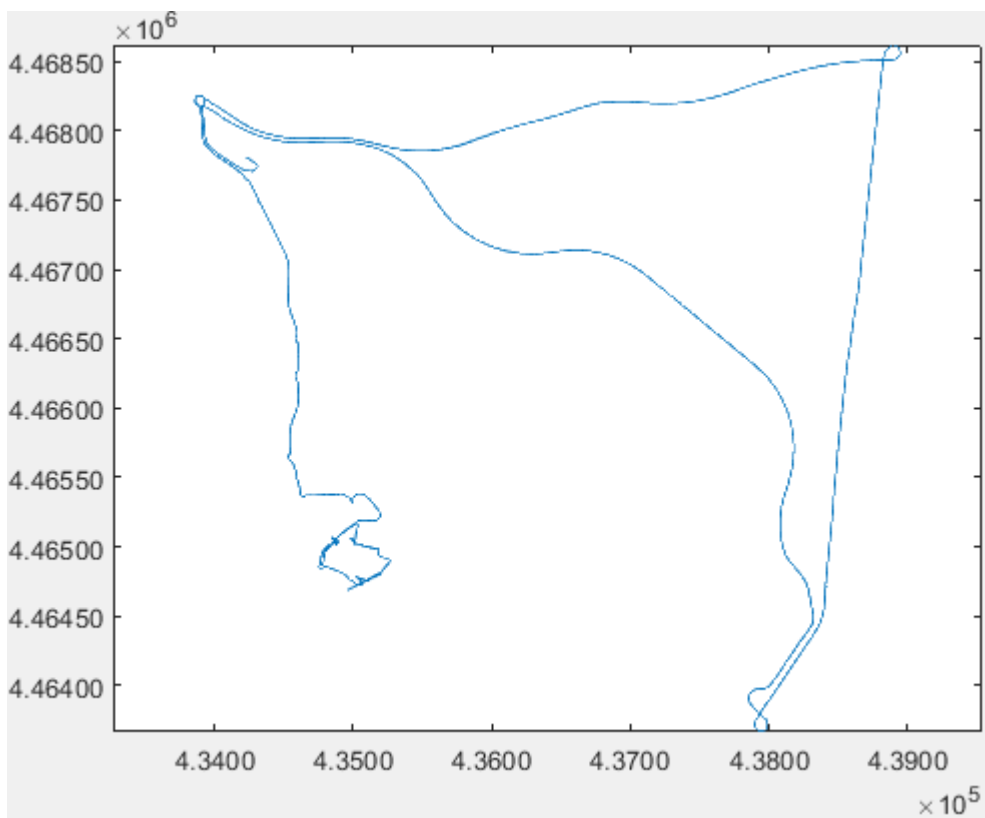
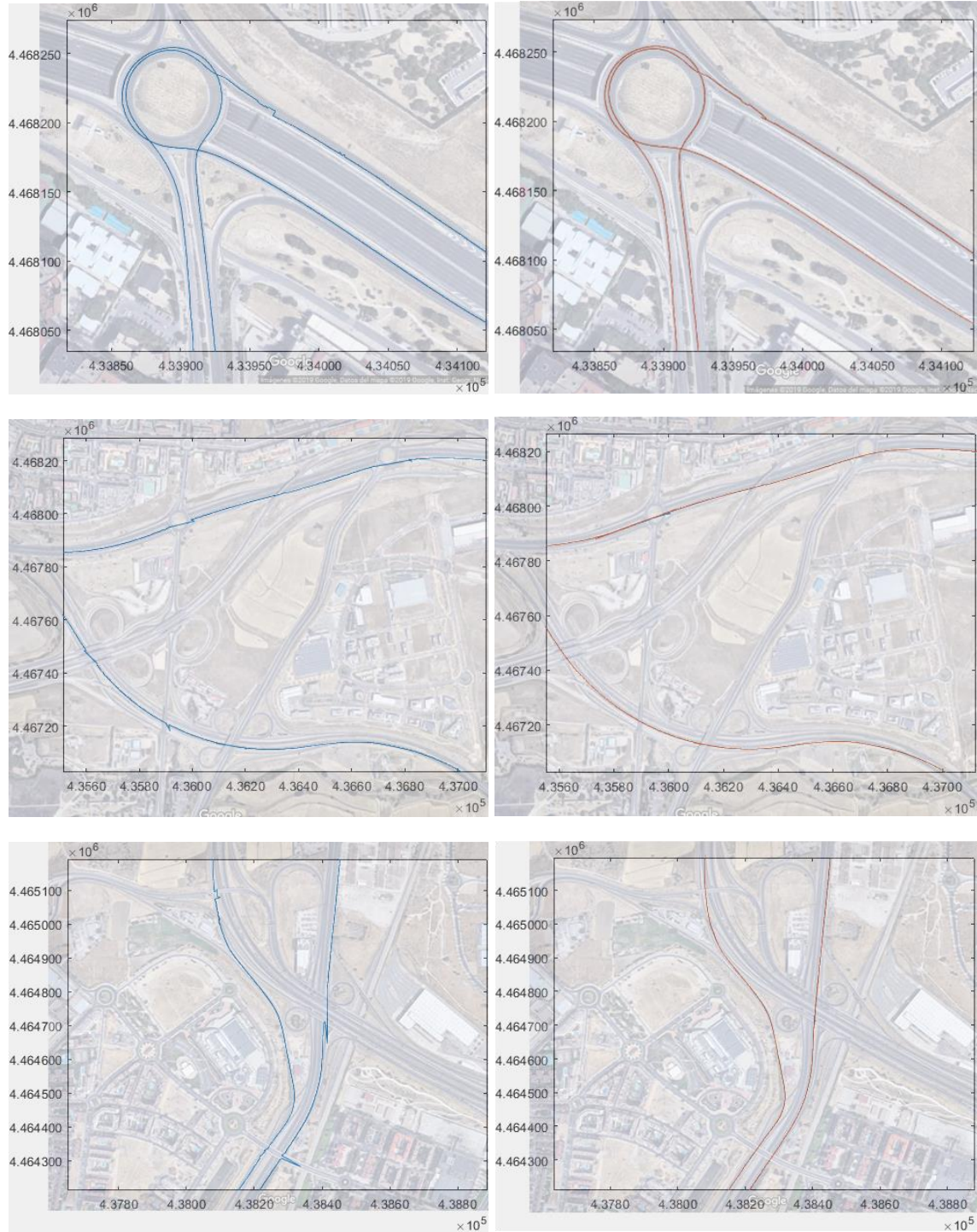
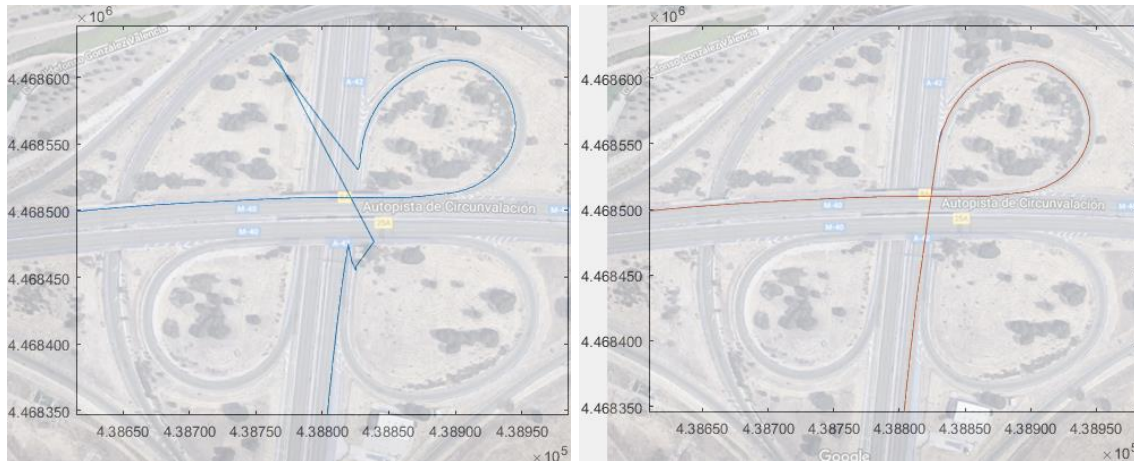


Ilustración 44: Imagen final, corregida con la diferencia de ángulos mediante coordenadas polares

5.6.2.1. Vías interurbanas

Se muestran detalles del entorno interurbano, comparando a la derecha las soluciones obtenidas por la detección mediante diferencia de ángulos (en rojo) y por la detección mediante diferencia de pendientes (en azul):





Como podemos observar, en entornos interurbanos la corrección es prácticamente la misma, aunque la corrección de los errores detectados por diferencia de ángulos (rojo) es hasta mejor en algunos puntos en comparación con la diferencia de pendientes (azul).

5.6.2.2. Vías urbanas

Se muestran los detalles del entorno urbano:

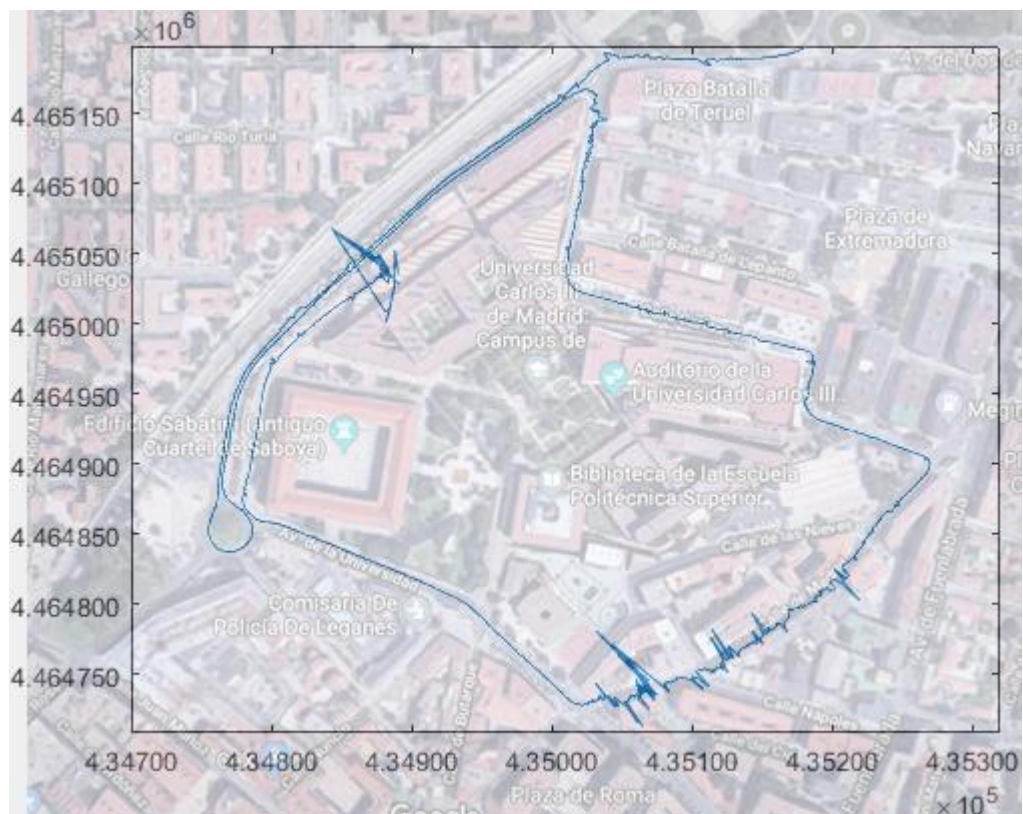


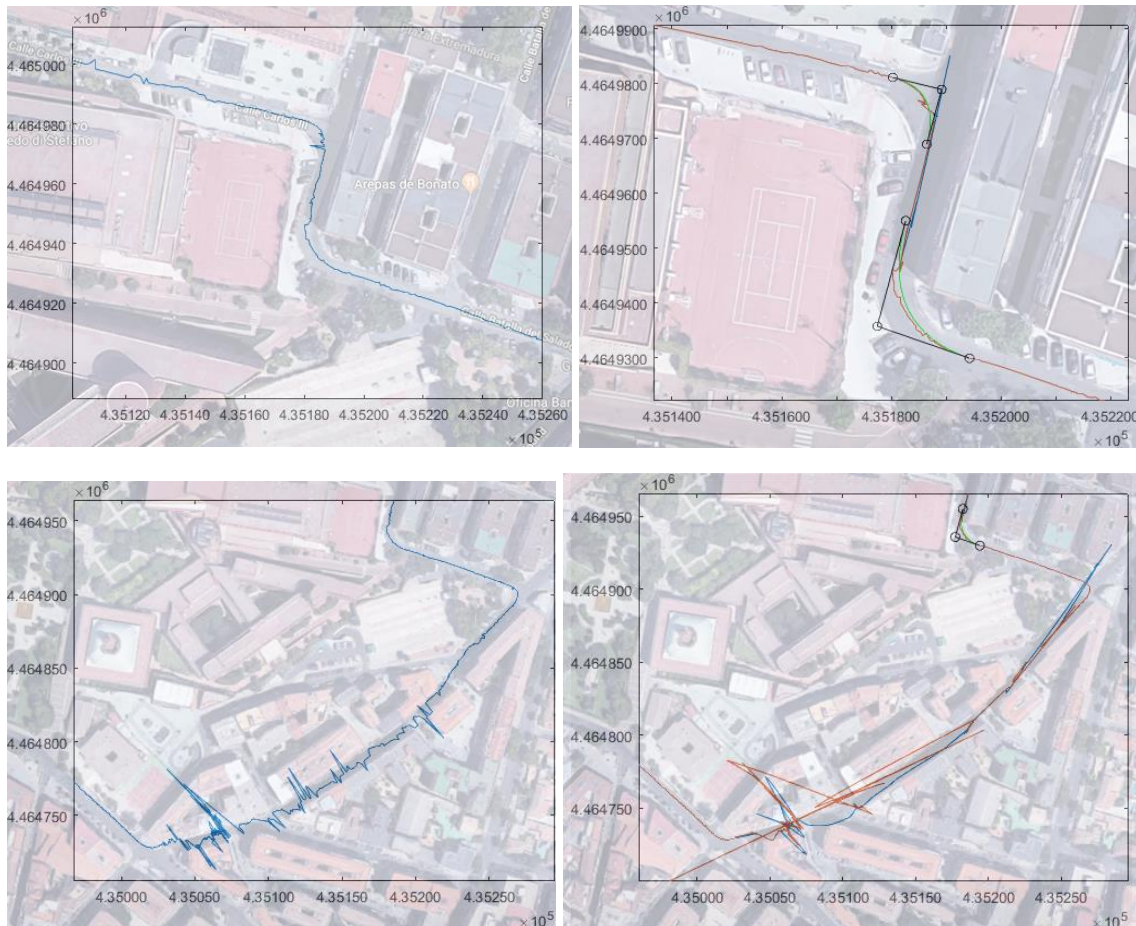
Ilustración 45: Trayectoria inicial



Ilustración 46: Trayectoria final, detectando errores mediante diferencia de ángulos

Como detalles de las últimas imágenes, marcando en azul la trayectoria en pendientes y en rojo la trayectoria en polares, mientras que las curvas verdes son las marcadas como las que deben de seguir teóricamente la trayectoria:





A pesar de que la mayoría de las correcciones en vías rápidas se realizan de la forma esperada, en los entornos con calles más cerradas se siguen viendo que las correcciones se distorsionan tanto o más que por el método de las pendientes. Esto se debe también a que la detección de puntos es distinta, por tanto habría que adaptar tanto los puntos a cambiar como los puntos a tener en cuenta para las rectas del punto auxiliar en cada tramo, al igual que hemos explicado en el apartado 5.6.1.2 de las pendientes en vías urbanas.

5.6.3. Análisis de las pruebas realizadas

Tal y como se ve y se explica en los apartados anteriores de éste capítulo, la cantidad de puntos, tanto a corregir como a utilizar para determinar la curva de Bézier, cambia según el método y los tramos. Así pues, durante el proceso se ha podido observar las siguientes normas de comportamiento a la hora de querer corregir las trayectorias mediante la aplicación de curvas de Bézier

- 1) Si vamos a corregir más puntos:
 - Si se cogen más puntos posteriores a cambiar, la nube de puntos posterior no debe aumentar más, sino que debe disminuir un poco.
 - Si se cogen más puntos anteriores a cambiar, hay que hacer lo mismo: la nube de puntos no debe aumentar tampoco y debe disminuir, de modo que la norma

sigue siendo de que la nube de puntos anterior debe de ser bastante menor a la nube de puntos posterior

- 2) Si no vamos a corregir más puntos y vamos a mantener el número de cambios constantes:
 - Si aumentamos las nubes de puntos, tanto anterior como posterior, esas nubes deben aumentar de forma aproximadamente proporcional pero siempre procurando que la nube de puntos anterior sea bastante menor a la posterior.
 - Por el contrario, si disminuimos una de las nubes, la otra también debe disminuir de forma aproximadamente proporcional.

5.7. Aplicación del algoritmo inteligente RANSAC para la mejora de estimación de trayectorias en calles céntricas y zonas muy urbanizadas.

Como se ha podido observar en los apartados anteriores, en las zonas muy urbanizadas son tanto los errores de posición cometidos, y algunos muy grandes, que provocan que a la hora de calcular las rectas mediante regresión de las nubes de puntos tanto anteriores como posteriores no salga el resultado esperado y por tanto el punto auxiliar para la curva de Bezier no es el calculado de forma correcta.

El problema de calcular las regresiones mediante mínimos cuadrados es que todos los valores del tramo se tienen en cuenta para que de forma estadística se obtenga una recta cuyos puntos se acerquen lo máximo posible y con un error mínimo a los puntos de la población utilizada, de modo que si existen datos atípicos también se tienen en cuenta, corriendo el peligro de que la recta no cumpla estrictamente con la mayoría de los datos que tienen menos error de posición.

Debido a esto se puede ver que la regresión por mínimos cuadrados puede resultar útil en las correcciones de vías rápidas, pero en zonas muy urbanizadas donde se cometen muchos errores de posición de forma sucesiva no resulta útil la aplicación de mínimos cuadrados, ya que puede cometerse grandes imprecisiones a la hora de estimar la recta que pretende “guiar” los tramos de carretera anteriores y posteriores para el cálculo del punto auxiliar. Por tanto se debe de utilizar un método que estime una recta sin tener en cuenta datos atípicos.

El algoritmo inteligente RANSAC permite obtener una recta o curva que cumpla con el orden que más se acerque a los datos representados, eliminando los datos que se pueden considerar atípicos por encontrarse a cierta distancia de la recta o curva deducida:

- 1) Selecciona aleatoriamente un grupo de puntos y los guarda como “inliners” (*dentro de línea*), es decir, puntos considerados correctos dentro de la línea estimada.
- 2) Realiza un regresión con los puntos eliminando los que están fuera de cierta distancia de la recta realizada, considerándolos “outliners” (*fuera de línea*).
- 3) Se realizan sucesivamente los pasos 1 y 2 anteriores hasta quedarse con el modelo que más puntos representativos contenga.

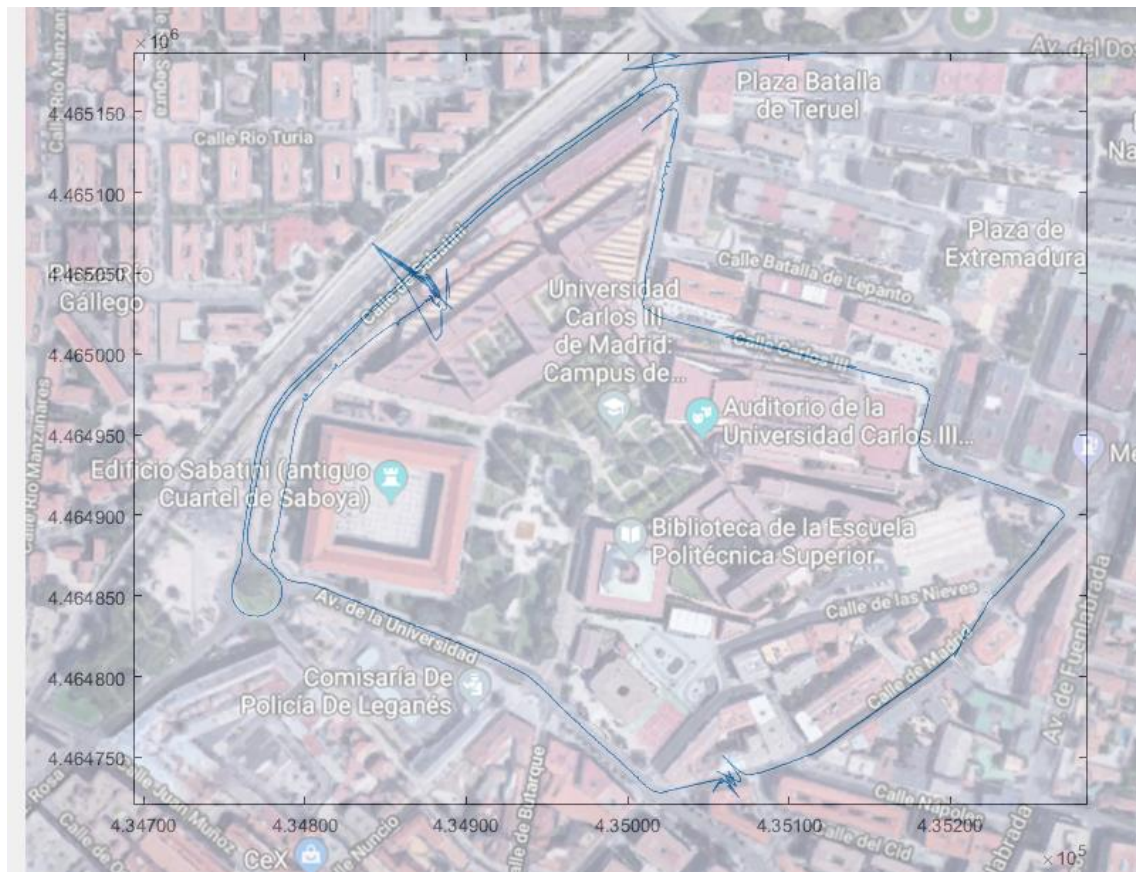


Ilustración 48: Trayectoria obtenida tras la aplicación de RANSAC para estimar las rectas

Como detalles observamos que las trayectorias mejoran:



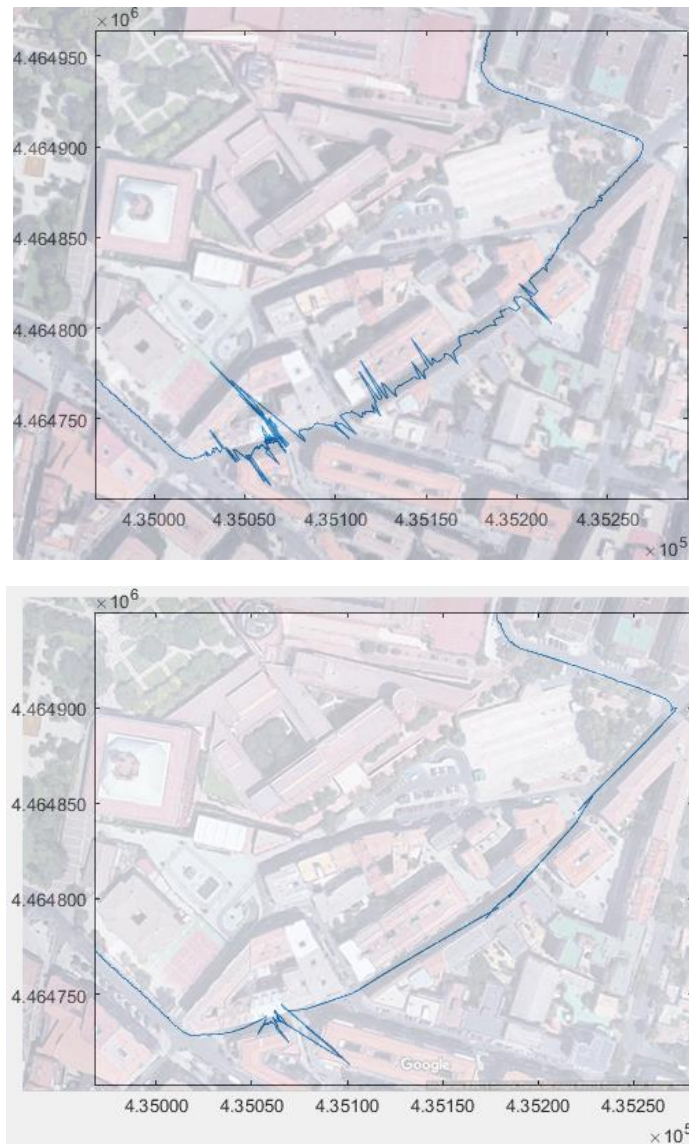


Ilustración 51: Detalle 3 de la corrección con RANSAC. NOTA: esta imagen no se corresponde con la corrección de la imagen general dada al comienzo de este apartado.

En la aplicación del algoritmo inteligente RANSAC para estimar las rectas del punto auxiliar, podemos observar que sigue habiendo una zona, aunque menor, en la que la distorsión es tan alta que no se consigue corregir del modo esperado.

Tras la aplicación de RANSAC y observando que salen menos distorsiones y de manera más puntual que en los resultados analizados anteriormente, se pueden proponer otros modelos inteligentes para eliminar estos picos como lo es el filtro de Kalman, el cual mediante un modelo dinámico lineal puede permitir detectar y eliminar los puntos que a continuación no siguen el recorrido marcado por la trayectoria.

Capítulo 6. Conclusiones

La aplicación de las curvas de Bézier para mejorar las trayectorias GNSS puede facilitar el uso de rutas bien definidas por vehículos autónomos.

Tras las pruebas experimentales realizadas y comentadas en el apartado 5, podemos ver que hay dos casos importantes en los que se hacen notar grandes diferencias en su aplicación:

- Para vías rápidas, tales como vías interurbanas formadas por autovías, autopistas y carreteras convencionales, como para avenidas y calles principales, el método resuelve prácticamente todos los errores de trayectorias con errores prácticamente despreciables con la realidad.
- Para zonas muy urbanizadas, como las que se pueden encontrar en centros urbanos con calles estrechas y edificios altos, la distorsión y pérdidas de las señales de los satélites GNSS provoca que no se puedan obtener las localizaciones correctamente. Esto repercute que dentro del algoritmo haya que aumentar las cantidades de puntos o para eliminar, o para utilizar a la hora de obtener las rectas del punto auxiliar. Al mismo tiempo el uso de algoritmo inteligente RANSAC ha permitido mejorar en este ámbito los trazados urbanos para conseguir mejores resultados a la hora de aplicar la curva de Bézier.

Como consecuencia de los errores cambiantes en los entornos urbanos frente a los entornos interurbanos, los parámetros referidos al número de puntos a eliminar, el número de puntos a coger tanto posteriormente como anteriormente, no hay unos valores fijos a los que aplicar a esos parámetros para que todo un trazado salga bien de primera mano, sino que cambian dependiendo del tamaño a evaluar.

Lo que se busca en caso de no poder corregir todos los tramos a la vez debido a las condiciones cambiantes, es intentar conseguir un modelo con el menor número de errores posibles. Así, además de tener una trayectoria aceptable, se procura que consiguiendo que los errores sean puntuales, estos puedan ser corregidos mediante otros procesos y algoritmos como el filtro de Kalman.

Capítulo 7. Propuestas a mejorar

en el futuro

No todo lo aplicado en este proyecto se puede considerar como definitivo y terminado, sino que hay aspectos en los que se pueden mejorar la aplicación de las curvas de Bézier. Para ello se propone

- Utilización de forma óptima de algoritmos inteligentes como RANSAC para mejorar la estimación de las rectas que propician el cálculo de los puntos auxiliares, y así aplicar la curva de Bézier de un modo más correcto y limpio. Además, estas herramientas junto con el filtro de Kalman, podrían conseguir una trayectoria final más sencilla y continua, limpia de interferencias.
- Creación de un algoritmo que en función de los tramos permita adaptar el número de puntos a escoger para realizar las rectas que permiten obtener el punto auxiliar de la curva de Bézier. Para esto puede resultar bastante útil las deducciones escritas en el apartado 5.6.3. Asimismo también se pueden cambiar la cantidad de puntos a corregir, alrededor del detectado como erróneo, para cambiarlos por los de la curva en función de la cantidad de errores del tramo a evaluar utilizando una media de las desviaciones de los tramos alrededor del punto.
- Mediante bases de datos y el empleo de programas de visión por computador, crear un método que permita utilizar curvas de Bézier en función del tramo a evaluar. Esto va dirigido sobretudo a si se quieren adaptar tramos más grandes en los cuales no se puedan resolver, mediante el algoritmo propuesto en este proyecto, por falta de datos provocada por entornos urbanos muy cerrados. Asimismo también podrían probarse para ello curvas de grados superiores de forma reiterada hasta que se consiga la más óptima, pudiendo calcular una curva más precisa.

Capítulo 8. Marco Regulador

A pesar de no tener regulación propia para estos vehículos, España se encuentra bajo regulaciones de la Unión Europea y convenciones firmadas.

La Unión Europea en si tampoco ha marcado todavía un reglamento al respecto, pero insta a los gobiernos de la Unión a facilitar el establecimiento de estos vehículos y no poner barreras legales, promoviendo para ello el cambio en la Convención de Ginebra de 1968 sobre circulación vial y la seguridad vial en la cual, mediante una enmienda aprobada en 2014, se establece finalmente que todo vehículo debe de tener un conductor (*artículo 1*) y que éste debe de poder controlarlo en todo momento (*artículo 2*) así como su actuación sobre sus sistemas que influyen en la conducción, llegando incluso a poder apagarlos (*enmienda de 2014*). Esta norma no contempla así que un vehículo plenamente autónomo pueda circular en sus plenas facultades o incluso sin conductor, por lo que posiblemente vuelva a ser enmendada en un futuro.

En cuanto a lo que concierne a España, esta convención fue firmada pero no ratificada, lo cual facilita que en el marco jurídico español se puedan tener en cuenta los vehículos plenamente autónomos. En España el vehículo autónomo no tiene todavía una regulación propia para su utilización. Sin embargo la Dirección General de Tráfico (*DGT*) está trabajando en ello ya que se espera que para 2020 empiecen a verse estos tipos de vehículos con ciertos grados de automatización en carreteras españolas. Actualmente la única regulación existente en España es sobre el uso de estos vehículos para fines de prueba o investigación, existente desde 2015[15]. A la espera de que la normativa de la DGT aparezca y entre en vigencia, el uso de estos vehículos puede emplearse, pudiendo repartirse las responsabilidades legales en caso de siniestros entre el conductor, titular del vehículo o fabricantes.

En el panorama internacional, Estados Unidos fue la primera en adoptar leyes reguladoras. A la espera de una ley federal, los distintos estados regularon el uso de este tipo de vehículos tanto para fines de investigación como para uso cotidiano, aunque dependiendo de los estados las leyes regulan en mayor o menor medida el uso cotidiano, llegando incluso a prohibirse el uso en ciudades. En la actualidad tienen una ley federal que prácticamente no se antepone ante ninguna de estas leyes y les dota a los fabricantes de cierta libertad a la hora de realizar sus actividades, pero poniendo como posibilidad de que un ordenador pueda conducir el vehículo cuando sea necesario y que faciliten la información de sus ensayos a la administración para que se conozcan el funcionamiento de éstos en caso de fallos. Hoy día es donde más se ha experimentado y donde el uso del vehículo autónomo existe, utilizándose mediante empresas de transportes como Uber o provocando la aparición de empresas como Waymo de Google o de “startups” como Voyage que implementan sistemas de automatización de vehículos con software libre.

En cuanto a otros países a mencionar, Japón permitió el uso de tramos de autovías para la realización de pruebas que permitan comprobar la tecnología existente y de los

nuevos avances para preparar el marco legal que pretende establecer el uso de los vehículos fuera de los circuitos y tramos de pruebas. Asimismo el gobierno japonés está desarrollando un mapeo exhaustivo del país para proporcionar a las empresas que fabriquen estos vehículos de una información sólida a la hora de que sus vehículos circulen de forma autónoma.

Capítulo 9. Entorno socioeconómico

9.1. Presupuesto

En la realización de este proyecto se han utilizado tanto recursos humanos como electrónicos.

Los aparatos utilizados han sido un navegador por satélite, capaz de utilizar señales de las constelaciones GNSS existentes en la actualidad como hemos visto en el capítulo 5.1 y un ordenador para utilizar un entorno software apropiado para el proyecto, en este caso Matlab.

Costes materiales				
Concepto	Importe unitario	Cantidad	Unidades	Total
Receptor GNSS	2.000,00 €	1	unidad	2.000,00 €
Ordenador	750,00 €	1	unidad	750,00 €
Licencia + Matlab Software	115,00 €	1	unidad	115,00 €
TOTAL				2.865,00 €

Tabla 3: Costes materiales del proyecto

En cuanto a recursos humanos se ha contratado a un ingeniero con un salario bruto de 1800€ mensuales. El tiempo utilizado para la realización de este proyecto ha sido de 4 meses.

Costes de personal				
Concepto	Importe unitario	Cantidad	Unidades	Total
Ingeniero Industrial	1.800,00 €	4	meses	7.200,00 €
TOTAL				7.200,00 €

Tabla 4: Costes de personal del proyecto

Con lo que el presupuesto total de este proyecto es:

Concepto	Importe
Costes materiales	2.865,00 €
Costes de personal	7.200,00 €
TOTAL	10.065,00 €

Tabla 5: Presupuesto total del proyecto

9.2. Impacto socioeconómico

Como se ha contado en la introducción de este proyecto, la utilización del vehículo autónomo se ha proyectado sobretodo desde el punto de vista de la seguridad debido a que reduce de forma drástica los errores de origen humano. Aunque quede mucho camino aun por conseguir el vehículo totalmente autónomo, las tecnologías ADAS han facilitado mucho la conducción de los vehículos que además han sido diseñados para el propio movimiento autónomo del vehículo. A la creación de entornos en tres dimensiones de lo que se encuentra alrededor del vehículo y del guiado de sistemas de navegación por satélite, se le añade también el interés por la comunicación entre vehículos de modo que se puedan evitar así desde posibles colisiones en lo particular, hasta atascos en lo general.

En cuanto a la utilización de los sistemas de navegación en aplicaciones como las que hemos tratado en este proyecto, el conocimiento de nuevas rutas corregidas pueden guardarse en bases de datos para su posterior utilización, al igual que ya existen bases de datos con las calles y dependiendo del país, hasta imágenes de callejeros e incluso de la red de países enteros. Esto acercaría la utilización del vehículo autónomo al nivel 5 de la autonomía total, o por lo menos mejoraría la automatización del nivel 4. Además, esto supondría una herramienta importantísima para el acondicionamiento de los sistemas del vehículo autónomo.

Si se consigue un grado de autonomía 5, las previsiones son que se mejorará:

- La seguridad: el error humano prácticamente puede desaparecer entre reconocimiento del entorno y comunicación entre vehículos.
- El tráfico: la conexión entre vehículos puede proporcionar información sobre aglomeraciones, evitando así posibles atascos y mejorando el orden y el movimiento en las ciudades.
- El entorno medioambiental: si lo anterior se cumple y se consigue que el tráfico sea más fluido, se reducen la cantidad de tiempo de los viajes y por tanto el tiempo que se encuentran los vehículos en marcha, reduciendo así la emisión de gases. Al mismo tiempo la automatización de los movimientos del vehículo supone que se pueda buscar un funcionamiento óptimo del motor.
- Económico: la utilización de vehículos autónomos puede suponer una reducción del gasto de combustible, así como ahorro de otros gastos como puede ser el de personal.

Precisamente por esto último puede haber problemas con la implantación de estos vehículos en las calles, debido a que en el sector del transporte puede haber personas cuyos trabajos puedan verse obsoletos. Al mismo tiempo puede no ser tan drástico este punto debido a que la automatización total es muy complicada de conseguir por la cantidad de situaciones que el vehículo debe de hacer frente y la posibilidad de que siempre pueda haber un imprevisto es alta, y por tanto para tareas de transporte de personas como de mercancías se requiera el servicio de profesionales.

También cabe decir que al mismo tiempo que ganamos seguridad y comodidad en trayectos, también se puede perder cierta libertad al estar todo controlado. Además, al

mismo tiempo hay que tener en cuenta que al aumentar la comodidad de no manejar el vehículo puede provocar el abandono de práctica y la pérdida de capacidades cognitivas a la hora de conducir los vehículos que la propia práctica ayuda a adquirir, de modo que en situaciones que se requieran el conductor puede no tener la habilidad suficiente como para actuar en consecuencia y por tanto es un factor de riesgo a tener en cuenta.

En cuanto a la adquisición de los vehículos por parte de particulares, hay que sumar el gasto extra de estos vehículos debido a los equipos y sistemas que llevan implantados a bordo, los cuales encarecen de forma considerable el precio de un coche poco automatizado a uno de alto grado de automatización.

Se espera que conforme pase el tiempo y se mejoren los sistemas y se vayan adaptando el marco jurídico, las infraestructuras e incluso las ciudades, la utilización del vehículo autónomo vaya en aumento. Se esperan que estos vehículos puedan encontrarse en los próximos años, con vistas a que aparezcan a partir de 2020 en España, aunque como ya dijimos en Estados Unidos ya hay empresas que los utilizan. Esto supone también un esfuerzo a añadir para preparar el marco jurídico sobre el que se pueden producir y utilizar estos vehículos, así como para adaptar infraestructuras en las ciudades.

Capítulo 10. Bibliografía

- [1] BERNÉ VALERI, J.L. [et al] (2014) *GNSS: GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática*. Valencia: Universitat Politècnica de València
- [2] Novatel: <https://www.novatel.com/>
- [3] NovAtel Inc, *An Introduction to GNSS: GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo and other Global Navigation Satellite Systems*, Second Edition. Calgary (Alberta, Canada): NovAtel Inc., 2015
- [4] A. Botella Plana, J. C. Olmedillas, “Geotelemática, posicionamiento y navegación”. Universidad Oberta de Catalunya. [En línea]. Disponible en: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/51541/1/Geotelem%C3%A1tica.%20Posicionamiento%20y%20navegaci%C3%B3n.pdf>
- [5] David Abelardo García Álvarez, “Sistema GNSS (Global Navigation Satellite System)”, Proyecto Fin de Carrera, Departamento de Ingeniería Informática, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España, 2008, [En línea]. Disponible en: <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20080125DavidGarcia.pdf>
- [6] European Comission – Galileo: <http://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/>
- [7] European GNSS Service Center: <https://www.gsc-europa.eu/>
- [8] ESA – Navipedia: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Main_Page
- [9] I. Alonso Fernández-Copel, “Localizaciones Geográficas. Las Coordenadas Geográficas y la Proyección UTM. (Universal Transversa Mercator)”. Geoasbuilt. <http://geoasbuilt.es/tutoriales/topografia/utm.pdf>
- [10] M. Paluszny, H. Prautzsch, W. Böhm, “*Métodos de Bézier y B-splines*”, Karlsruhe, Universitätsverlag Karlsruhe, 2005.
- [11] L. Fernández Jambrina, “Tema 2: Curvas de Bézier”. Universidad Politécnica de Madrid. http://ocw.upm.es/matematica-aplicada/curvas-y-superficies-en-el-diseno-geometrico-asistido-por-ordenador/contenido/curvas_polinomicas/documentacion/tema2.pdf
- [12] GALDAMES BRAVO, Orlando. *Modelización con curvas y superficies de Bézier*. Modelling in Science Education and Learning, [S.l.], v. 4, p. 181-193, jun. 2011. ISSN 1988-3145. Disponible en: <https://polipapers.upv.es/index.php/MSEL/article/view/3071>. Fecha de acceso: 20 feb. 2019 doi:<https://doi.org/10.4995/masel.2011.3071>.
- [13] D.G.T., “*Principales cifras de la Siniestralidad Vial. Edición Ampliada España 2017*”, Observatorio Nacional de Seguridad Vial, España, 2018

- [14] D.G.T., “Informe y análisis sobre influencia de los sistemas de ayuda a la conducción en la seguridad vial y su aplicación para la clasificación de vehículos”, Ministerio del Interior, Dirección General de Tráfico, Octubre 2016. [En línea]. Disponible en: <http://revista.dgt.es/images/INFORME-SISTEMAS-DE-AYUDA-A-LA-CONDUCCION-copia.pdf> (Acceso: 15 Feb. 2019).
- [15] Dirección General de Tráfico (2015). *Tráfico establece el marco para la realización de pruebas con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas a la circulación*. [En línea]. Disponible en: <http://www.dgt.es/Galerias/prensa/2015/11/NP-pruebas-vehiculos-conduccion-automatizada.pdf> (Acceso: 15 Feb. 2019).
- [16] L. Montoro González, A. Martí-Belda Bertolín, I. Lijarcio, P. Bosó, C. López, “Coche Autónomo, seguridad vial y formación de conductores”, Universidad de Valencia - Grupo de investigaciones INTRAS.
- [17] R.A.C.E., “Coches autónomos: la carrera hacia una autonomía total”, RACE, <https://www.race.es/coches-autonomos-carrera-autonomia-total> (Acceso: 15 Feb.2019)
- [18] Revista km77, “Conducción autónoma. Niveles y tecnología”, *Revista km77*, <https://www.km77.com/reportajes/varios/conduccion-autonoma-niveles> (Acceso: 15 Feb. 2019)
- [19] J.C. López, “Dónde está realmente el coche autónomo a día de hoy y qué han prometido las marcas en el Salón de Ginebra para el futuro”, Xakata, <https://www.xataka.com/automovil/donde-esta-realmente-el-coche-autonomo-a-dia-de-hoy-y-que-han-prometido-las-marcas-en-el-salon-de-ginebra-para-el-futuro> (Acceso: 19 Feb. 2019)
- [20] J. Expósito, “Los españoles desconfían del coche autónomo”, *Diario El Mundo*, Diciembre 2018, [En línea]. Disponible en: <https://www.elmundo.es/motor/2018/12/21/5c1cafd3fdddf8a2b8b45bd.html> (Acceso: Febrero 2019)
- [21] D. González Aguilera, J. Gómez Lahz, N. Sánchez Martín, B. Arias Pérez, “Vectorización Automática en el cálculo de puntos de fuga sobre un fotograma oblicuo”, presentado en VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía, Madrid, 19-22 Octubre 2004. [En línea]. Disponible en: <http://www.cartesia.org/geodoc/topcart2004/conferencias/13.pdf>
- [22] Google Maps: <https://www.google.com/maps>
- [23] SAE: <https://www.sae.org/>